APRENDA FISICA EN 15 DIAS

396

CHRISTIAN GELLERT
con la dirección técnica del
INC. FRANCISCO L. SINGER

BIBLIOTECA "RODOLFO PUIGGRÓS" 23 JUN 2006
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANÚS

APRENDA FISICA EN 15 DIAS

UNLa
BIBLIOTECA "RODOLFO PUIGGRÓS"
INVENTARIO: 015307
SIG. TOPO: 530 G396 ej.1

SEGUNDA EDICION

"BIBLIOTECA Y CENTRO DE DOCUMENTACION"
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LANUS

Biblioteca UNLa
015307

EDITORIAL NEO TECNICA

ARENALES 1258 BUENOS AIRES

Primera edición: *1975*

Queda hecho el depósito que marca la Ley Nº 11.723

Copyright © by FRANCISCO L. SINGER

IMPRESO EN LA ARGENTINA

PRINTED IN ARGENTINA

Día 1

Encararemos el estudio de una de las ciencias más apasionantes y que más ha interesado al hombre desde los albores de la civilización. La Física estudia los cuerpos como agrupaciones de materia, sus movimientos y todo otro fenómeno que no cambie su naturaleza, en contraposición con la Química que precisamente se dedica a cambiar la composición de la materia, a transformar una substancia en otra. El problema más importante que se presentó al preparar este libro fue el de la extensión del temario, cuyo desarrollo debía ser comprimido en una reducida cantidad de páginas y se resolvió sintetizando la descripción de los aparatos que en el pasado sirvieron para encontrar o demostrar los fenómenos. Los importantes son mencionados pero se ha preferido destacar la interpretación moderna y describir aplicaciones prácticas de los principios y aparatos que los utilizan.

En esta primera jornada hablaremos de la materia y los cuerpos que ella integra, enumerando las propiedades fundamentales y las formas o estados en que se halla, así como los cambios en tales estados. Y así comienza nuestra tarea.

LA MATERIA Y LOS CUERPOS

Si nos sentamos en el banco de un parque y miramos a nuestro alrededor veremos muchas cosas: plantas, casas, agua, gente, vehículos, piedritas, etc. Y hay cosas que no vemos pero que están allí, como el aire, partículas diminutas esparcidas por el suelo y objetos ubicados dentro de otros que no dejan ver su interior. O sea que en el mundo no hay espacios vacíos sino que todo está ocupado por la *materia*, no importa la forma, el tamaño o las características que ella posea. Cantidades de materia se agrupan para formar un *cuerpo* y todo el espacio que queda entre los cuerpos lo llena el aire, aunque esto no lo veamos; sabemos que el aire existe, simplemente. Pero, hay cosas fáciles de comprobar: si soplamos dentro de un globo para inflarlo, ¿qué le hemos introducido que lo mantiene inflado? – aire, que está allí dentro hasta que lo dejemos salir, librando la abertura que tiene el globo en el pico. Aire es también lo que mantiene infladas las cubiertas de los automóviles y lo que, desplazándose con rapidez, forma el viento.

La materia entonces es lo que constituye todos los cuerpos, algunos rígidos, otros flexibles; algunos no pueden quedarse en un sitio si no los colocamos dentro de un recipiente, otros necesitan un recipiente cerrado porque sino se escapan de él. Algunos cuerpos están quietos, otros se mueven; unos son pequeños, tanto que a veces ni se ven, otros son grandes, macizos o huecos. Lo primero que haremos será clasificar a los cuerpos por su estado.

Estado de los cuerpos

Se llama *estado* de un cuerpo a las características físicas que presenta en cuanto a su conformación y a la propiedad de mantenerla. Fundamentalmente encontramos en la naturaleza tres estados de los cuerpos: *sólido, líquido* y *gaseoso*, si bien hay estados intermedios y estados especiales.

Los *sólidos* mantienen su forma y, colocados sobre un plano horizontal, mantienen su posición. Esa forma puede ser cambiada si interviene un fenómeno exterior; un trozo de goma puede ser estirado o comprimido si se ejerce un esfuerzo sobre él, pero dejado sobre una mesa conserva su forma y posición.

Los *líquidos* se esparcen indefinidamente en sentido horizontal y entonces se los debe colocar dentro de recipientes, a los que ocupan hasta un cierto nivel. La forma de los líquidos es entonces

la del recipiente y el nivel superior es siempre horizontal.

Los *gases* se esparcen en todas direcciones y entonces deben ser colocados dentro de recipientes cerrados, a los que llenan totalmente. Muchos gases son totalmente transparentes y por ende invisibles, otros tienen ciertas coloraciones que permiten verlos. El aire, por ejemplo, es un gas invisible mientras que el monóxido de carbono del escape de los motores diesel tiene una coloración negruzca mientras no se expanda demasiado, y entonces deja de verse.

¿Son siempre diferentes cuerpos los que presentan uno de los tres estados? No, puesto que el agua, por ejemplo, es líquida, pero si se la enfría adquiere el estado sólido (hielo) y si se la calienta adquiere el estado gaseoso (vapor); el hierro, un sólido duro, calentado convenientemente pasa al estado líquido. Y siguiendo los ejemplos encontraríamos que la mayoría de los cuerpos pueden tener dos estados y aún tres. Esos pases de uno a otro estado se hacen mediante la intervención de un agente externo, que casi siempre es el frío o el calor. A veces esa acción es involuntaria y parecería que no hubo tal agente como, por ejemplo, si derramamos un poco de agua en el piso, al día siguiente habrá desaparecido. ¿Hubo agente externo que provocó el cambio de estado? Sí, el calor del aire produjo la evaporación del agua, o sea el pasaje del estado líquido al gaseoso. Pero otras veces la acción del cambio de estado es dificultosa y además del calor o el frío hay que acudir a operaciones complejas; por ejemplo, para licuar el aire hay que someterlo a grandes presiones además del enfriamiento y una vez líquido, hay que mantenerlo a una temperatura del orden de los 200 grados bajo cero porque sino se vuelve gas nuevamente.

Cambios de estado de los cuerpos

Hemos mencionado circunstancialmente algunos casos de cuerpos que cambian de estado físico pero conviene ir ordenando las definiciones y explicaciones para acostumbrarnos a estudiar con método. Los pasajes de un estado a otro reciben denominaciones especiales que están representadas en la figura 1. Los círculos representan los tres estados clásicos de los cuerpos y los rectángulos dan los cambios de estado. Nótese que comunmente se pasa de un estado al contiguo, pero hay un caso especial de pasaje directo del estado sólido al gaseoso, que se llama *sublimación*, que se presenta raramente, pero que existe. El ejemplo típico es el del *yodo*; una pastilla de yodo dejada sobre la mesa a la temperatura ambiente se sublima, es decir pasa directamente al estado de gas, formándose vapores de yodo.

Es importante destacar que no todos los cuerpos cumplen con el gráfico dado. Por ejemplo, los metales pueden fundirse pero la madera no; al someterla al calor se quema pasando al estado pulvurento (cenizas). Ya no se trata de un cambio de estado físico sino de una transformación de una materia en otra, cosa que entra en el dominio de la Química, como veremos más adelante.

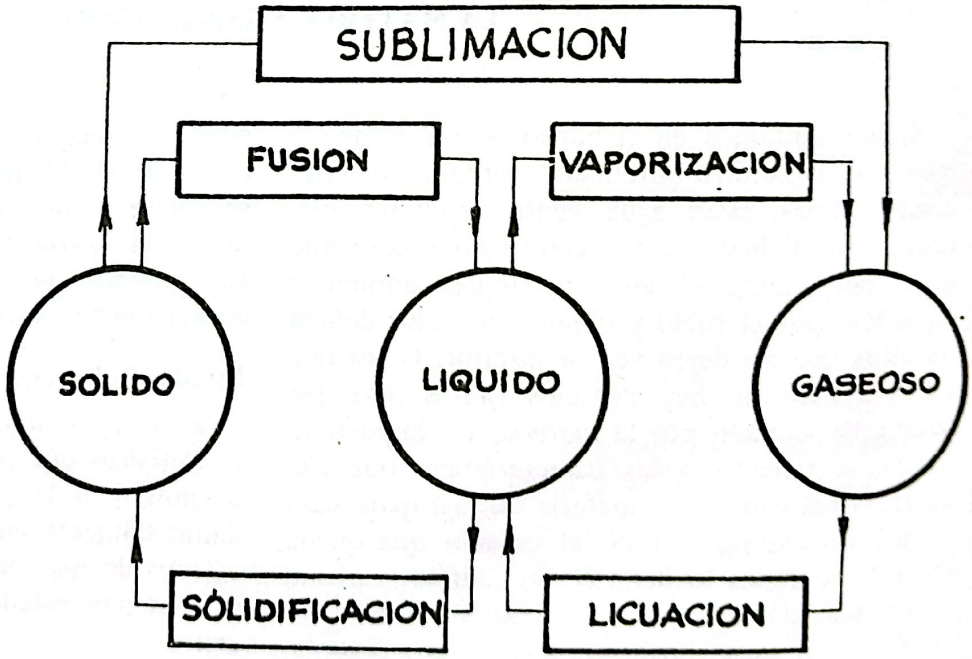


Fig. 1. – Denominaciones de los cambios de estado de los cuerpos.

Estados especiales

Ciertos cuerpos, por lo general formados por la mezcla de un sólido con un líquido, para lograr lo cual el sólido se reduce a polvo, ad-

quieren un estado intermedio entre el sólido y el líquido, lo que puede denominarse estado *pastoso*. El ejemplo más simple es el barro, mezcla de tierra con agua; según las proporciones, el comportamiento del barro se asemeja más al de un líquido o al de un sólido. El cemento, la masilla, el yeso, el engrudo, son otros tantos ejemplos de tal estado intermedio. Si hacemos una bola con masilla y la colocamos sobre una mesa, se irá aplastando lentamente, o sea que no se comporta como un sólido que conserva su forma ni como un líquido que se expande inmediatamente.

Si insuflamos una corriente de aire u otro gas a través de un líquido, el primero arrastra partículas del segundo, formando un chorro que presenta un comportamiento intermedio entre los estados líquido y gaseoso. Y si ese líquido es una mezcla de un sólido con un líquido de vaporización automática a la temperatura ambiente, ocurre que el chorro mezclado se esparce sobre la superficie adonde se lo proyecta y luego el líquido se vaporiza quedando el sólido en forma de una delgada capa. Este procedimiento se emplea en cosmética y en pintura.

Otro caso de estado que aparece como especial sería el de las *gotas*. Un líquido sale por un orificio de pequeñas dimensiones y forma una esfera que se estira por efecto del peso propio. Si la depositamos sobre una superficie plana la esfera se mantiene aunque se achate un poco por efecto de su peso propio. Esto ocurre siempre con el mercurio, por ejemplo; con el agua podemos lograr lo mismo si engrasamos el plano sobre el que la depositamos. Este fenómeno ofrece una aparente contradicción con el comportamiento de los líquidos, pues no se produce la expansión o derrame. Bueno, no hay tal contradicción, pues lo que ocurre es un fenómeno debido a la *tensión superficial* que estudiaremos más adelante; si pinchamos la gota de agua se producirá el derrame y el fenómeno desaparece.

Constitución íntima de la materia

Los diferentes comportamientos de los cuerpos según el estado físico en que se encuentren, sea uno de los tres estados básicos o uno de los intermedios, nos lleva a pensar que la razón de esos comportamientos debe investigarse en la constitución íntima o interna de la materia. Nos referiremos primero a los sólidos, porque en ellos se puede comprender más fácilmente lo que explicaremos, pero extenderemos los resultados a los otros cuerpos.

Si tomamos un ladrillo y lo golpeamos lo reduciremos a trozos; golpeando los trozos obtendremos pedazos cada vez más pequeños hasta que finalmente nos quedará un polvo que ya no se puede dividir en trozos. Cada granito de polvo se llama *partícula* y tiene la misma constitución del ladrillo.

Dijimos que las partículas no pueden subdividirse, pero eso no quiere decir que no tengan muchas partes integrantes. Es que para subdividirlas harían falta martillos del tamaño de las partículas y operarios micromilimétricos. Pero la ciencia moderna dispone de aparatos para ver en forma ampliada objetos invisibles para el ojo humano y esos supermicroscopios han permitido ver que las partículas no son sólidas; el ojo las ve sólidas por el mismo defecto que le hace ver sólida, con aspecto de un disco macizo, a una rueda con rayos que gira velozmente, o que hace que una piedra atada a un hilo que la hace girar aparece como un aro macizo.

Bien, si tomamos diminutos corpúsculos que se mueven muy rápidamente tendremos la apariencia de un cuerpo sólido: la partícula; pero en realidad no hay tal sólido sino que se trata de *moléculas* que asi se llaman esos corpúsculos en movimiento. Todos los cuerpos están formados por infinidad de moléculas, en cantidades astronómicas. Al romper un sólido vamos separando grupos de moléculas mientras el tamaño del martillo lo permita; asi llegamos a las partículas de polvo y no podemos seguir rompiendo, pero cada partícula tiene muchas moléculas. Lo que no podríamos hacer es romper una molécula, porque es la porción más ínfima de esa materia.

Sin embargo, hay una ciencia que estudia la subdivisión de la molécula, ya que hay moléculas simples y compuestas. Por ejemplo, el sodio es un cuerpo que tiene moléculas simples y el cloro también; combinando sodio y cloro se forma sal de cocina, llamada cloruro de sodio, que tendrá moléculas compuestas. Esa ciencia es la Química y precisamente se diferencia de la Física en que estudia los cambios de la naturaleza íntima de la materia. La Física estudia los cambios que no alteran esa naturaleza íntima. Si fundimos un cuerpo pasaremos de un sólido a un líquido, pero el cuerpo será el mismo pese a su cambio de estado; estamos dentro de la Física. Si combinamos dos o más cuerpos de diferente materia para lograr otro cuerpo diferente, como en el caso del sodio y el cloro que nos daba sal, estamos en el dominio de la Química.

Luego, la Física estudiará lo que pasa con las moléculas pero sin cambiar la constitución de las mismas; el hierro sólido o líquido es siempre hierro. La madera quemada deja de ser madera para

ser ceniza, un cuerpo distinto y entonces eso sería motivo de estudio en Química.

Acciones entre moléculas

Con las moléculas pasa una cosa muy curiosa pero ello explica todos los fenómenos que vimos antes. Dijimos que las moléculas son corpúsculos en continuo movimiento, pero cada cuerpo se caracteriza por la cantidad de moléculas que tiene, ya que si tiene pocas estarán muy separadas entre si y si tiene muchas, estarán muy cercanas. La figura 2 nos quiere mostrar dos moléculas *A* y *B* de tres substancias distintas, o sea que presentan diferentes distancias *d* entre moléculas. Claro que tanto los tamaños de las moléculas como las distancias entre las mismas aparecen agrandados muchos millones de veces.

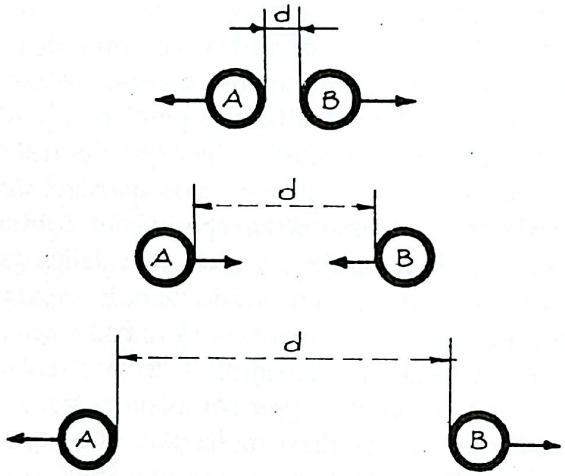


Fig. 2. – Entre las moléculas hay atracciones y repulsiones según sea la distancia entre ellas.

Si las moléculas están muy próximas, o sea a distancia *d* muy chica, se repelen entre sí; si están medianamente alejadas, caso central de la figura, se atraen y si están muy alejadas, a distancia *d* grande, se repelen.

Las fuerzas que producen la atracción entre moléculas forman lo que se llama *cohesión* y explica la existencia de cuerpos sólidos, que sería el caso central de la figura 2. Si comprimimos con alta presión a un sólido reducimos su tamaño, pero cada vez hace falta mayor fuerza de compresión. Es que se presenta el caso de la ilustración superior de la figura, porque cuando las moléculas se han acercado entre si aparecen las fuerzas de repulsión que impiden que se siga comprimiendo el cuerpo o que para hacerlo haya que hacer esfuerzos enormes.

Si alejamos un poco las moléculas de la ilustración central de la figura 2, las fuerzas de atracción van desapareciendo y estamos frente a los cuerpos líquidos, con muy poca cohesión. Si las moléculas está más alejadas llegamos a la ilustración inferior donde hay fuerzas de repulsión y entonces se trata de un cuerpo gaseoso donde la expansión es permanente. Si encerramos un gas en una botella, las moléculas golpearán continuamente contra las paredes de la misma para tratar de expandir más al gas, debido a que entre todas las moléculas hay repulsión. Pero si se comprime un gas hasta acercar bastante sus moléculas, se reduce la fuerza de repulsión y se llega al estado líquido. Comprimiendo más aún, se puede lograr distancias entre moléculas para la cual se produzca el cambio de repulsión por atracción y pasaremos del gráfico inferior al central, obteniendo un cuerpo sólido.

No solamente mediante compresión o expansión se puede alterar el estado de los cuerpos provocando el paso de uno a otro estado. Dijimos que las moléculas están en continuo movimiento; si calentamos un cuerpo esos movimientos se hacen más rápidos e inclusive las moléculas chocan entre sí. Todo ello hace que se produzcan repulsiones entre moléculas que van venciendo a las fuerzas de atracción y según la naturaleza del cuerpo y la cantidad de calor que recibe se llega al paso del estado sólido al líquido, o sea a la fusión. Si seguimos calentando ese cuerpo aumentan los movimientos moleculares y con ello la repulsión entre moléculas, produciéndose finalmente la vaporización, o sea el paso del estado líquido al gaseoso.

El proceso inverso también se cumple. Si enfriamos un gas, se reducen los movimientos moleculares y con ello las fuerzas de repulsión, con lo que se puede llegar a la licuación. Si seguimos enfriando el cuerpo que ahora es líquido, desaparecen las repulsiones entre moléculas y comienzan a actuar fuerzas de atracción, gráfico central de la figura 2, hasta que se pasa al estado sólido mediante la solidificación.

¿No explica esta teoría el estado de los cuerpos y los cambios de estado que describimos antes? La explica perfectamente, por lo cual recomendamos al lector que repase esta explicación acerca de acciones intermoleculares hasta entenderla bien, ya que es de importancia decisiva. No solamente comprenderemos los estados y sus cambios, sino que sabremos el porqué de las presiones que ejercen los líquidos contra las paredes del recipiente que los contiene y los gases contra todo el recipiente: son las moléculas que al ser repelidas entre sí tratan de alejarse unas de otras; al encontrar una pared, ejercen una presión sobre ella para tratar de sobrepasarla. Si la resistencia de tal pared es vencida el recipiente se rompe y el líquido o el gas sigue su expansión obligada.

La rotura de los diques y la explosión de los tubos de gas son casos de presiones de líquido o gas que vencen la resistencia de las paredes de contención. Los sólidos, al tener sus moléculas a distancias chicas, ilustración central de la figura 2, presentan cohesión en lugar de expansión, y esos fenómenos no se producen.

Propiedades de los cuerpos

Los distintos cuerpos sólidos presentan características que los distinguen unos de otros, aunque a veces hay grupos de cuerpos que tienen similares propiedades. Tal es el caso de los metales, que poseen muchas cualidades comunes. Entre las propiedades destacadas de los sólidos, podemos citar la maleabilidad, la ductilidad, la elasticidad, la dureza, la fragilidad, la fusibilidad, la tenacidad, la combustibilidad, etc.

La *maleabilidad* es la propiedad que tienen algunos sólidos, casi exclusivamente los metales, de poderse reducir a láminas. La operación (figura 3) se llama *laminado* y se realiza mediante

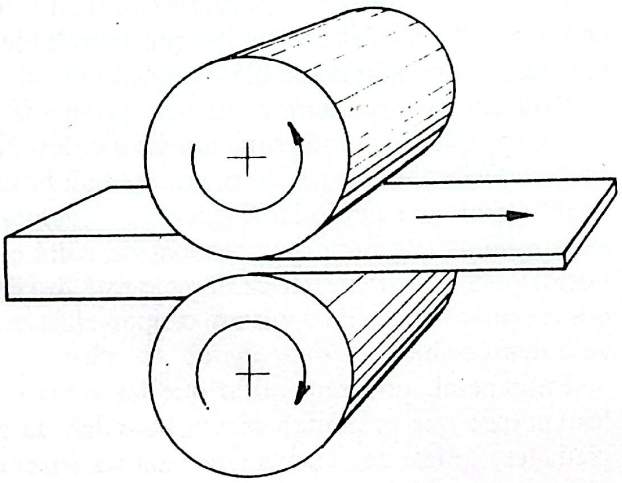


Fig. 3. – La propiedad de poderse formar láminas con un metal se llama maleabilidad.

paso del cuerpo por rodillos que giran en sentidos encontrados. Se aplica para obtener chapas de reducido espesor, de diversas aplicaciones. Muchas veces hay que calentar previamente el metal antes de ser laminado.

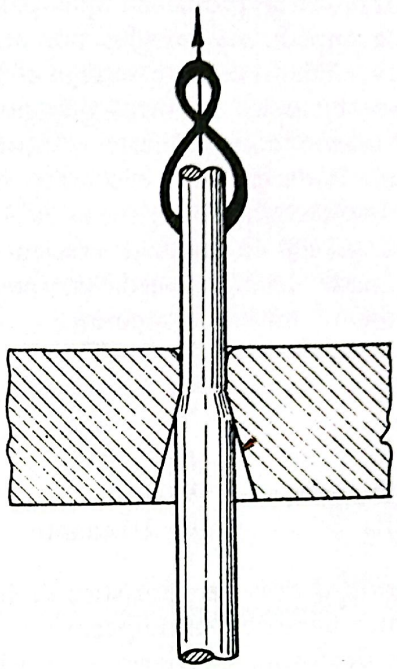


Fig. 4. – La propiedad de poder formar hilos con un cuerpo se llama ductilidad.

La *ductilidad* es la propiedad que tienen algunos sólidos, metales casi únicamente, de poder ser reducidos a hilos. La operación se llama *trefilado* (figura 4), y se realiza haciendo pasar al metal, por estirado, por un orificio en forma de embudo, cuyo menor tamaño está en la parte de la salida del hilo ya formado. La fabricación de cables eléctricos se hace por este procedimiento, trefilando cobre químicamente puro.

La *elasticidad,* es la propiedad de los sólidos de recuperar su forma después de someterlos a ligeras deformaciones. Si se toma una vara metálica (figura 5) y se la apoya en sus dos extremos, cargando un peso en la parte central, se deformará. Si el peso no es muy grande, o si la deformación cae dentro de lo que se llama: *límite de elasticidad,* al quitar el peso la vara vuelve a su forma primitiva. Hay casos de elasticidad extraordinaria, como el de los derivados del caucho, pero en general todos los cuerpos tienen cierta elasticidad, aunque los metales en mayor grado que los otros cuerpos.

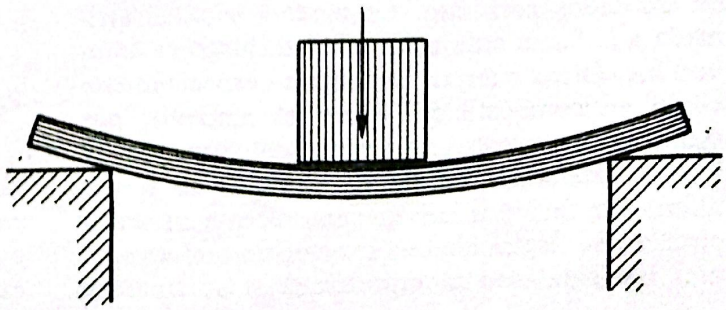


Fig. 5. – La propiedad de adquirir deformaciones transitorias se llama elasticidad.

La *dureza* es la propiedad que presentan los cuerpos de impedir ser rayados por otros. Es conocida la facilidad con que se raya el plomo con la uña, por ejemplo, mientras que no se puede hacer lo mismo con el hierro y otros metales. Para definir la dureza de los cuerpos se los compara con otros conocidos, para lo cual se confeccionó una escala de durezas crecientes. En tal escala, llamada de *Mohs*, cada cuerpo es rayado por el siguiente, en orden superior:

1) Talco
2) Yeso
3) Espato calizo
4) Espato fluor
5) Apatita
6) Feldespato
7) Cuarzo
8) Topacio
9) Esmeril
10) Diamante

La *fragilidad* es la característica de los cuerpos de quebrarse al recibir un impacto o al querer ser cambiados de forma. El vidrio se quiebra al pretender ser doblado. La fundición se quiebra al golpe. Nada tiene que ver la fragilidad con la dureza u otra propiedad, pues el talco es blando y quebradizo, mientras que el acero es duro y frágil. La fragilidad, en cambio, es en cierto modo opuesta a la elasticidad, pues los cuerpos muy elásticos son poco frágiles, pero al sobrepasar el límite de elasticidad adquieren súbitamente la propiedad de ser quebradizos.

La *fusibilidad* es la propiedad que presentan los sólidos de poder pasar al estado líquido. Algunos son más fusibles que otros, lo que está revelado por el punto de fusión, temperatura a la cual comienza a pasar al otro estado.

La *tenacidad* es la resistencia que oponen los cuerpos a ser destruidos, o sea, es la mayor o menor fuerza de cohesión que presenta un cuerpo. Al estirar un trozo de hierro, se nota que hay que hacer un gran esfuerzo para romperlo, mientras que un trozo de idéntico tamaño de madera u otro cuerpo menos tenaz que el hierro, se rompe con menor esfuerzo. No se confunda la tenacidad como propiedad opuesta de la fragilidad, porque un acero muy frágil puede ser a la vez muy tenaz.

La *combustibilidad* es la propiedad que presentan algunos cuerpos de arder o quemarse al ser excitados para ello. La madera seca, al arrimarla a la llama arde con facilidad, luego es combustible. Otros cuerpos se fabrican especialmente como anticombustibles, como el amianto, por ejemplo, para preservar a objetos del fuego.

La *conductibilidad* de los cuerpos se puede referir a la facilidad con que trasmiten a su través el calor, la electricidad, el magnetismo, el sonido, etc. En cada caso se especificará si se trata de conductibilidad calorífica, eléctrica, etc. Además, se clasificará a los cuerpos en conductores y aisladores de cada agente. Por ejemplo, el cobre es un buen conductor de la electricidad, mientras que la porcelana es aisladora. Los metales son buenos conductores del calor, mientras que los materiales refractarios son aislantes.

Algunas de las propiedades particulares de los sólidos pueden ser extendidas a los líquidos, como la conductibilidad, combustibilidad y fusibilidad, que en este caso se cambiaría por la propiedad de poder vaporizarse, pues el gas o vapor es el estado que le sigue en orden correlativo. Un líquido puede ser fácilmente evaporable o no.

Además de las citadas, agregaremos la *compresibilidad,* que es la propiedad de poder reducir su tamaño bajo la acción de fuerzas exteriores. Los líquidos, igual que los sólidos, la presentan en muy pequeño grado, salvo algunos casos particulares, como el de la goma.

La *solubilidad* es la propiedad que tienen los líquidos de admitir otros líquidos o sólidos en su seno. Al echar azúcar al agua, se disuelve, formando parte del líquido. Ciertos sólidos son solubles en determinados líquidos y no en otros, comó es el caso del celuloide, que es soluble en acetona, el amoníaco soluble en agua, etc.

Para los gases podemos citar en primer término las propiedades que son comunes a los otros estados físicos, como ser la conductibilidad, combustibilidad y solubilidad. Además, tenemos la expansibilidad, general para todos los gases y vapores, pues es característica de este estado físico, que impulsa a las moléculas a ocupar el máximo volumen posible.

En general, podemos notar que los sólidos son los cuerpos que presentan mayor variedad de propiedades, pues se encuentran substancias con muy diferentes características. Así, el yeso no es maleable, ni dúctil, ni elástico, ni tenaz, ni conductor, mientras que el cobre tiene en alto grado todas las propiedades mencionadas. Entre los líquidos hay menor similitud, salvo en las dos características de combustibilidad y conductibilidad, que son también las propiedades que diferencian unos gases de otros, pues en los demás detalles son similares, en cuanto a comportamiento se refiere.

Propiedades recíprocas — Adherencia

Hemos enumerado las propiedades más importantes de los cuerpos, tomados individualmente, es decir que un cuerpo determinado presenta alguna o varias de las propiedades enunciadas. Hay otras propiedades que pueden considerarse recí-

procas, o sea que se refieren al comportamiento de ciertos cuerpos al estar en contacto con otros. En realidad, algunas propiedades enumeradas como particulares o propias, son recíprocas, como sería el caso de la combustibilidad, que ocurre al poner un cuerpo en contacto con la llama que es otro cuerpo y el de la solubilidad, que ocurre al colocar un cuerpo dentro de otro. Pero, esas propiedades se consideraron propias porque uno de los cuerpos en contacto es el que sufre la acción del fenómeno o cambio.

Cuando la particularidad o el fenómeno afecta a ambos cuerpos se habla de propiedad recíproca. Un caso que tiene importancia en el estudio de la Física es el de la *adherencia.*

Cuando dos substancias diferentes están en contacto, sea por estar arrimadas o por estar una en el seno de la otra, se produce una atracción entre las moléculas de ambas, que se llama adherencia. Si mojamos una placa metálica con agua, parte del agua quedará sobre la placa aunque la misma esté en posición vertical, debido a la adherencia entre el líquido y el sólido. La acción de la cola y de la soldadura se explica por la adherencia, la cual se intensifica fabricando sustancias que la presentan en mayor grado que otras. Dos placas de acero bien pulidas quedan adheridas al tocarse, por acción del mismo fenómeno.

Veamos un caso concreto que tiene importancia por las conclusiones que se pueden obtener. Si dejamos caer una aguja de acero en un vaso de agua, la misma se sumergerá de inmediato y se irá al fondo, por ser su peso por unidad de volumen mucho mayor que el del agua; este tema será estudiado en detalle más adelante, pero el hecho es conocido y no necesita mayores explicaciones. Pero si la engrasamos para que no se moje y la colocamos suavemente acostada sobre el agua, no se sumergerá sino que quedará flotando (figura 6). ¿Qué ha ocurrido? Que las fuerzas de adherencia son mayores que las del peso que la tira hacia abajo. Y si pasamos con cuidado un hilo por debajo de la aguja y la levantamos lentamente, observaremos que la superficie del agua se deforma, levantándose levemente junto con la aguja (figura 7). Esas fuerzas actuantes en la superficie de un líquido constituyen la *tensión superficial.*

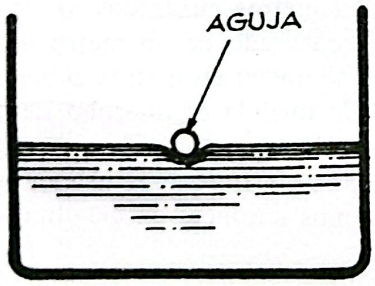


Fig. 6. – Una aguja engrasada flota en el agua por efecto de la adherencia.

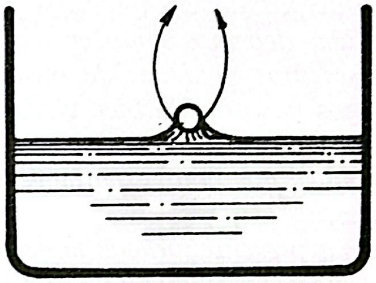


Fig. 7. La tensión superficial se pone de manifiesto al retirar la aguja.

Las grandes masas líquidas presentan una superficie plana horizontal en contacto con el aire; en esa superficie actúan las fuerzas de adherencia en forma de tensión superficial. Dentro de la masa líquida actuan las fuerzas de atracción entre las moléculas. Pero si tomamos una pequeña porción líquida, la tensión superficial es mayor que las fuerzas internas de cohesión, y se forma una esfera, que es la forma que presenta la menor superficie externa. Esta es la razón por la cual se forman gotas cuando un líquido sale por pequeños orificios o se derrama lentamente sobre una superficie engrasada para impedir que la misma se moje de inmediato. El peso propio hace que la gota se estire mientras está cayendo y se aplaste cuando llega a la superficie donde cae, pero la tensión superficial mantiene la gota. Si se la pincha el líquido se derrama pues esa acción exterior en forma de fuerza vence a la tensión superficial. Este tema se estudiará más detalladamente al ocuparnos de los líquidos y en particular de la capilaridad.

Día 2

Un objeto es grande o chico según la observación y apreciación popular, pero el grandor siempre se refiere a una idea comparativa: claro, una mesa es un objeto grande si nuestra mente la compara con sillas, libros o copas pero es un objeto chico si la colocamos en una estación terminal de ferrocarril. Por eso, los tamaños y los pesos de los cuerpos deben apreciarse por medición o sea comparándolos con una unidad de medida; debemos conocer las unidades y sus derivados. Pero en otros países suelen usarse otras unidades de medida y hay que especificar las equivalencias con las que usamos nosotros. Si bien el sistema métrico decimal que se emplea en nuestro medio es el más generalizado, es común que encontremos dimensiones en pulgadas, velocidades en millas por hora y nafta vendida por galones, cuando las referencias vienen de otros países.

La presente jornada la dedicaremos entonces al estudio de las medidas y el peso de los cuerpos, enumerando sus unidades y dando las equivalencias con las unidades extranjeras más conocidas; pongamos manos a la obra.

MEDIDAS Y PESO DE LOS CUERPOS

La Física estudia el estado de reposo y de movimiento de los cuerpos y por ende debemos conocer sus dimensiones y sus desplazamientos; conocer en el sentido literal es una cosa y conocer en el sentido físico es asignarle cifras a tales dimensiones y movimientos. En el estudio de los líquidos, por ejemplo, veremos lo que ocurre con cuerpos sumergidos en los mismos y entonces, además de las dimensiones del cuerpo habrá que conocer su peso para estudiar lo que ocurre. Y con las medidas y los pesos encontraremos a veces cifras raras que provienen de países que tienen sistemas de medidas diferentes al nuestro; por ejemplo oiremos hablar de velocidades en millas por hora, de cargar en un coche tantos galones de nafta, de placas de madera de media pulgada de espesor, etc.

Toda dimensión o magnitud física debe ser expresada por un número y una unidad; por ejemplo, el largo de una mesa se expresa por un número como 1,80 seguido por la unidad que es el metro y diremos que esa mesa tiene 1,80 metros, o simplemente 1,80 m de largo, habiéndose puesto en la segunda mención la abreviatura *m* de la unidad *metro*.

Las líneas tienen una sola dimensión que es el largo o *longitud*; los planos tienen dos dimensiones que dan una *superficie*; y los cuerpos tienen en general tres dimensiones que resultan en un *volumen*. Nuestro maravilloso sistema de medidas, que es el *Sistema Métrico Decimal*, usa las mismas medidas para esas tres magnitudes. Hay sistemas de medidas usados en otras partes que no tienen esa ventaja. Veamos: las longitudes se miden en metros, o sea que la unidad de medida es una recta de un metro de larga. Las superficies se miden en metros cuadrados, o sea que la unidad es un cuadrado de un metro de lado; y los volúmenes se miden en metros cúbicos, o sea que la unidad de medida es un cubo de un metro de arista. Simplísimo, ¿no? Claro que en lugar del metro se pueden tomar sus múltiplos o submúltiplos. Veamos entonces en detalle esas unidades.

Medidas de longitud

Nùestro sistema de medidas se basa en un patrón de longitudes, que fue construido tomando como base la medición de una cuarta parte del meridiano terrestre. Esa medida se la dividió por 10 millones, y resultó una barra de cierta longitud, que se llamó: *metro*. Con esa base se formó el *sistema métrico decimal* para toda clase de mediciones.

Con ello se pensó desterrar la antigua anarquía imperante en los sistemas de medición de cada

país, pero sin embargo subsisten aun viejas unidades de medidas que son distintas al metro. La vara, la yarda, etc., son ejemplos característicos. El inconveniente de las unidades de medida que no pertenecen al sistema métrico decimal, aparece en las fórmulas técnicas, porque hay que introducir factores de corrección. Por tal motivo es muy conveniente reducir todas las fórmulas a unidades derivadas del metro, a fin de evitar esas correcciones.

El metro tiene múltiplos y submúltiplos, que pueden usarse a voluntad, cuando resulte conveniente. Por ejemplo, para medir distancias entre ciudades, sería incómodo andar hablando de 150.000 metros, por tenerse cifras muy grandes. En ese caso es preferible usar el Kilómetro, que equivale a 1000 metros, y esa distancia mencionada sería de 150 Kilómetros. Lo mismo podríamos decir en el caso de las piezas pequeñas de mecánica, que para medirlas en metros habría que utilizar decimales con muchos ceros. Empleando el milímetro, que es la milésima parte del metro, se soluciona el inconveniente.

También con el metro y sus derivados se forman las medidas de superficie y volumen. Con sus respectivos múltiplos y submúltiplos. Y la gran ventaja del sistema métrico decimal estriba en que para medir capacidades, se usa una unidad derivada de las medidas de longitud, como veremos.

Conviene familiarizarse con las medidas de longitud y sus derivados, así como con las abreviaturas que las designan, pues en la práctica no se acostumbra a escribir palabras largas como Kilómetro, sino que se abrevia Km, simplemente. Veamos cuáles son esas unidades:

Unidad fundamental	.....	1	metro .... :	m
Múltiplos	1 Kilómetro	1000	metros .... :	Km
	1 Hectómetro	100	metros .... :	Hm
	1 Decámetro	10	metros .... :	Dm
Submúltiplos	1 decímetro	0,1	metro .... :	dm
	1 centímetro	0,01	metro .... :	cm
	1 milímetro	0,001	metro .... :	mm

De la observación de la tabla anterior se ve que para usar múltiplos o submúltiplos de una unidad, no hay más que usar prefijos con el nombre de la unidad fundamental. Así, a cualquier unidad se le agrega el prefijo Kilo, y se la convierte en una unidad 1.000 veces mayor. Conviene entonces acostumbrarse a esos prefijos, porque los usaremos con frecuencia:

Mega	1.000.000	abrev.	M
Kilo.....	1.000	„	K
Hecto ...	100	„	H
Deca	10	„	D
deci	$\frac{1}{10}$	abrev.	d
centi	$\frac{1}{100}$	„	c
mili	$\frac{1}{1.000}$	„	m
micro ...	$\frac{1}{1.000.000}$	„	μ

Un prefijo usado repetido, quiere decir que afecta dos veces a la unidad con el factor de equivalencia. Así, se presenta en la Técnica el caso de usar una unidad para la medición de la capacidad de los capacitores, que es un billón de veces más chica que la unidad fundamental, el Farad. Se le antepone dos veces el prefijo de reducción un millón, es decir, se escribe:

$$\mu\mu F$$

Y se lee: micro-micro-Farad. Como vemos, las unidades no presentan dificultades si se conocen sus nombres, y los prefijos para pasar a los múltiplos y a los submúltiplos.

La costumbre hace usar con preferencia algunas unidades derivadas, dejando de lado las fundamentales. Así, para distancias geográficas se emplea el Km., para medidas de piezas mecánicas, utilizamos el mm.; para el magnetismo, se usa mucho el cm., etc. Hay que habituarse a conocer las abreviaturas, porque es casi la única forma como se las escribe.

Conviene conocer las unidades extranjeras que difieren de las del sistema métrico decimal, para poder efectuar las reducciones en el caso necesario. Las más usuales entre las de longitud son, con sus equivalencias:

1 Pie (')	0,305 m	... 305 mm
1 Pulgada (") ...	0,0254 m	... 25,4 mm
1 Vara	0,866 m	... 86,6 cm
1 Yarda	0,914 m	... 91,4 cm
1 Braza	1,83 m	... 183 cm
1 Legua	5.196 m	... 5,196 Km
1 Milla inglesa ...	1.609 m	... 1,609 Km
1 Milla marina ...	1.853 m	... 1,853 Km

De modo que conociendo una medida expresada en cualquiera de las unidades anteriores, para pasar al sistema métrico decimal no hay más que multiplicarla por la equivalencia numérica respectiva. Así, si tenemos que una madera tiene un espesor de 2 pulgadas (2"), y queremos pasar a la medida en milímetros, como es correcto, multiplicamos por la equivalencia:

$$2 \times 25{,}4 = 50{,}8 \text{ mm}$$

Medidas de superficie

Para formar la unidad básica de medidas de superficie, el sistema métrico decimal toma un cuadrado de un metro de lado, y a esa superficie la toma como unidad, llamándola: *metro cuadrado.* Una superficie cualquiera se calcula determinando cuántas veces cabe en ella la superficie unidad, es decir, averiguando cuántos metros cuadrados tiene. Claro que también se usarán los múltipos y submúltiplos, en la misma forma como en el caso de las longitudes.

En cada caso tendremos la designación de la unidad, la aplicación del prefijo para convertirla en un múltiplo o en un submúltiplo, el símbolo para distinguirla mediante una abreviatura, y hasta la equivalencia con las unidades extranjeras:

1 Km cuadrado tiene 1.000.000 m^2 y se abrevia Km^2
1 Hm cuadrado tiene 10.000 m^2 y se abrevia Hm^2
1 Dm cuadrado tiene 1.000 m^2 y se abrevia Dm^2

1 m^2 tiene 100 dm cuadrados, y se abrevia dm^2
1 m^2 tiene 10.000 cm cuadrados, y se abrevia cm^2
1 m^2 tiene 1.000.000 mm cuadrados, y se abrevia mm^2
1 dm^2 tiene 100 cm^2 y 10.000 mm^2

Vemos que cada múltiplo está relacionado con el siguiente por el factor 100, como corresponde por multiplicar 10 X 10, ya que se trata de superficies.

En cuanto a las equivalencias con medidas extranjeras de superficie, son las derivadas de las de longitud ya conocidas. Las más usuales son:

1 Pulgada cuadrada	6,45 cm^2	645 mm^2
1 Pie cuadrado	0,0929 m^2	929 cm^2
1 Vara cuadrada	0,75 m^2	75 dm^2
1 Yarda cuadrada	0,836 m^2	83,6 dm^2
1 Milla inglesa cuadrada .	2,6 Km^2	

De modo que si se presentan dimensiones o superficies de piezas u objetos expresados en las unidades que no pertenecen al sistema métrico decimal, puede pasarse sin ninguna dificultad a nuestro juego de unidades con sólo multiplicar por la equivalencia respectiva. Así, si una plancha de chapa de hierro tiene una superficie de 20 pies cuadrados, diremos que esa chapa tiene una superficie de:

$$20 \times 0{,}0929 = 1{,}858 \text{ m}^2$$

Medidas de volumen

Un cuerpo cualquiera ocupa un cierto volumen en el espacio. Para medirlo se ha adoptado una unidad de medición, que se formó tomando un cubo de un metro de lado. Luego, para determinar el volumen del cuerpo, se determina cuántas veces cabe en él la unidad, y se expresa el número obtenido, diciendo que el cuerpo ocupa un volumen de tantos metros cúbicos. Claro que pueden usarse los múltiplos y submúltiplos de la unidad básica de volumen, en la misma forma como se hacía para las longitudes y las superficies, adoptando la equivalencia y colocando el prefijo respectivo al nombre de la unidad, el metro cúbico, que abreviamos m^3.

En la determinación de volúmenes son poco usados los múltiplos del metro cúbico, siendo más comunes los submúltiplos. Por tal motivo consideraremos estos últimos. También tendremos medidas extranjeras de volumen, cada una de las cuales tendrá su equivalencia con cualquiera de las del sistema métrico decimal. Para reducirlas, no habrá más que multiplicar por esa equivalencia, es decir multiplicar la cifra que expresa el volumen dado en la unidad extranjera por el número que da la cantidad de veces que ella es mayor que la unidad métrica decimal. La tabla de equivalencias se da más adelante para poder usarla cuando se necesite. Veamos cuáles son los submúltiplos del metro cúbico:

1 m^3 = 1.000 dm^3 = 1.000.000 cm^3
1 dm^3 = 1.000 cm^3 = 1.000.000 mm^3
1 cm^3 = 1.000 mm^3

Es decir, que cada submúltiplo está relacionado con el inmediato superior o inferior por un factor 1.000. Eso es evidente, puesto que cada prefijo tiene un valor 10 veces superior o inferior al inmediato, y como en el volumen se multiplican tres veces entre si, es decir, se elevan al cubo, y el cubo de 10 es 1.000 resulta lo antedicho.

Las medidas extranjeras de volumen son derivadas de las respectivas de longitud y superficie, siendo las más comunes, con sus respectivas equivalencias:

1 Pulgada cúbica	16,386 cm^3
1 Pie cúbico	0,0283 m^3
1 Yarda cúbica	0,0764 m^3

De manera que una cantidad que representa un volumen, expresado en cualquier unidad extranjera, para reducirla al sistema métrico decimal no hay más que multiplicarla por la equivalencia. Así, si tenemos 50 pies cúbicos de arena, podemos reducirlos a metros cúbicos de la siguiente manera:

$$50 \times 0{,}0283 = 1{,}415 \text{ m}^3$$

Con las unidades y sus respectivos múltiplos y submúltiplos que forman el sistema de medidas descriptas, podrían resolverse todos los problemas de Geometría, pero el sistema métrico decimal tiene otras derivaciones que conviene conocer, pues se presentarán a menudo en la Física. Nos referimos a las medidas de capacidad y de peso, que son derivados o complementarias de las de volumen. En la práctica se presenta muy a menudo la necesidad de completar un problema, calculando la capacidad de un depósito conociendo su volumen, o determinar el peso de un objeto conociendo también su volumen o sus dimensiones.

Medidas de capacidad y peso

El sistema métrico decimal enlaza las medidas de volumen, capacidad y peso en una forma ingeniosa. Toma la unidad derivada del metro cúbico que es 1.000 veces más chica que él, es decir, el dm^3 y construye un cubo con ese volumen, es decir, con un dm por lado. A la capacidad de ese cubo la designa con el nombre de un *litro* (ver figura 8). Esta es la unidad de capacidad, el litro. Tiene sus múltiplos y submúltiplos, que se escriben anteponiéndoles un prefijo, en la misma forma que para las otras medidas.

Para el peso, se toma un cubo de un centímetro de lado, que tiene un volumen de 1 cm^3 y se

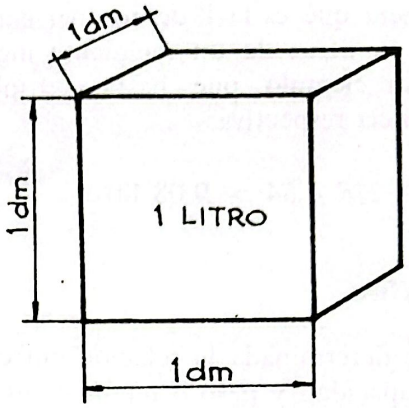


Fig. 8. Un cubo de un decímetro de lado tiene la capacidad de un litro.

lo llena de agua destilada. Se pesa y esa cantidad es la unidad de peso, que se llama *gramo*. También se pueden obtener unidades derivadas anteponiendo los prefijos conocidos.

Hay unidades extranjeras conocidas de capacidad y peso, que tienen una equivalencia determinada. Daremos las más usuales para que se puedan resolver los problemas que se presentan en la práctica.

Las unidades más usuales derivadas del litro son:

1 Hectolitro	Hl	. . . que vale 100 litros
1 Decalitro	Dl	. . . que vale 10 litros
1 decilitro	dl	. . . que vale 0,1 litros
1 centilitro	cl	. . . que vale 0,01 litros

De modo que es fácil determinar, de acuerdo con lo que antecede, que un litro tiene 10 decílitros, o 100 centílitros, etc.

Para las medidas de peso, tendremos los múltiplos y submúltiplos del gramo, cuyas equivalencias con éste serán:

1 Kilogramo . . . .:	Kg que vale	1.000 gramos (g)
1 Hectogramo . . .:	Hg que vale	100 gramos (g)
1 Decagramo. . . .:	Dg que vale	10 gramos (g)
1 decigramo . . . .:	dg que vale	0,1 gramos (g)
1 centigramo . . .:	cg que vale	0,01 gramos (g)
1 miligramo . . . .:	mg que vale	0,001 gramos (g)

De las cuales la más usada es el Kg por ser el gramo una unidad algo pequeña. En la práctica se acostumbra a dar el peso de las cosas en Kg.

Las unidades extranjeras más usadas de capacidad o de peso, tienen los mismos países de origen que las de longitud, y sus equivalencias son:

1 Galón inglés	4,54 litros
1 Galón U.S.A.	3,785 litros
1 Libra	454 gramos
1 Onza	28,3 gramos
1 Quintal	45,36 Kilogramos

De manera que es fácil determinar cuál será la capacidad en litros de un recipiente inglés de 2 galones, por ejemplo, pues basta multiplicar por la equivalencia respectiva:

$$2 \times 4{,}54 = 9{,}08 \text{ litros}$$

Peso específico

Una vez determinada la relación entre las medidas de capacidad y peso o también entre las de volumen y peso, falta detallar cómo se determina el peso de una sustancia cualquiera que no sea el agua. Hemos dicho que un centímetro cúbico de agua destilada pesa un gramo. También puede decirse, por simple extensión de esta definición, que 1.000 cm^3 de agua pesan 1.000 gramos o sea que 1 dm^3 pesa 1 Kg.

Para otros cuerpos que no sean el agua también puede relacionarse el volumen con el peso, pero aclarando que un centímetro cúbico no pesará ya un gramo sino una cantidad distinta. Se puede fijar como base para los cálculos el peso de un centímetro cúbico de cualquier sustancia, expresado en gramos, y con él calcular el peso de cualquier otro volumen.

Esa cantidad, peso en gramos de un centímetro cúbico, o peso en Kilogramos de un decímetro cúbico, se llama *peso específico.* Se insiste en que el peso de la unidad de volumen coincide numéricamente, si se toma en gramos por centímetro cúbico o en Kilogramos por decímetro cúbico.

Así, cuando decimos que el peso específico del hierro es igual a 7,8 Kg/dm^3, queremos decir que un volumen de hierro de un dm^3 pesa 7,8 Kg, exactamente. Igualmente, para el aceite, por ejemplo, decimos que su peso específico es de 0,92 Kg/l, con lo que se quiere decir que un litro de aceite pesa 0,92 Kg, o sea 920 gramos.

Ademas conviene llamar la atención sobre el hecho de que incorrectamente suele confundirse el peso específico con la densidad cuyo concepto es distinto para la Física y que veremos más adelante.

A título ilustrativo damos a continuación los pesos específicos de los materiales de utilización corriente en la Física, para poder disponer de la tabla en los casos necesarios.

Pesos específicos de diversas substancias

LIQUIDOS		SOLIDOS	
Substancia	**Kg/dm³**	**Substancia**	**Kg/dm³**
Aceite de oliva	0,92	Acero	7,8
Aceite lubricante	0,91	Aluminio	2,6
Acido sulfúrico:		Bronce	8,0
al 7,5 %	1,05	Carbón	3,5
al 27 %	1,20	Cobre	8,9
al 50 %	1,40	Corcho	0,24
al 87 %	1,80	Cuero	0,9
Agua destilada a 4° C	1,0	Ebonita	1,15
Agua a 15° C	0,99	Estaño	7,2
Alcohol	0,79	Hierro	7,8
Amoníaco	0,65	Latón	8,6
Anilina	1,04	Mármol	2,7
Benzol	0,90	Mica	2,95
Cloro	1,5	Níquel	8,6
Eter	0,74	Oro	19,3
Glicerina	1,26	Papel	0,9
Mercurio	13,6	Plata	10,5
Naftalina	1,15	Platino	21,4
Petróleo	0,8	Plomo	11,3
Parafina	0,9	Porcelana	2,4
Sulfato de cobre	1,10	Tungsteno	19,1
Sulfato de zinc	1,10	Vidrio	2,7
Sulfuro de carbono	1,29	Zinc	7,2

Día 3

Una vez que hemos hablado de la materia y especificado la manera de fijar dimensiones de porciones de ella que forman cuerpos, podemos comenzar a tratar los agentes o fenómenos que afectan a dichos cuerpos. El que nos ocupará en esta jornada es la fuerza o acción capaz de mover a un cuerpo; un hombre empujando un baúl ejerce una fuerza, pero también el motor de un automóvil ejerce una fuerza para hacerlo marchar. Y todavía podemos mencionar la fuerza que realizan los frenos para terminar con el movimiento. Así podemos ampliar la definición diciendo que fuerza es lo que cambia el estado de reposo o de movimiento de los cuerpos.

Pero antes de ocuparnos de los efectos de las fuerzas debemos estudiar la forma de representarlas, de medirlas, de combinar sus particularidades. Entonces, en esta primera parte del tema acerca de las fuerzas trataremos solamente el concepto estático de las fuerzas como agentes físicos, dejando los efectos para próximas jornadas.

LAS FUERZAS Y SU EQUILIBRIO – ESTATICA

En los capítulos anteriores hemos mencionado varias veces la palabra fuerza, sea en forma directa o indirecta. La atracción o la repulsión entre moléculas, por ejemplo, eran fuerzas; el peso de los cuerpos es una fuerza, pues es el efecto que la tierra ejerce sobre los cuerpos en forma de atracción; la tensión superficial que mantiene formada una gota de agua es una fuerza. Y es que el simple hecho de que presionemos con el dedo sobre la mesa no es otra cosa que una fuerza que ejercemos. En otras palabras, la acción que obra sobre un cuerpo en reposo para moverlo o sobre un cuerpo en movimiento para frenarlo es una fuerza, no importando para el caso que tal acción la realice un ser humano, un motor o la naturaleza.

El estudio de las fuerzas es muy importante en la Física, pero hay dos maneras de estudiarlas: una se refiere a los efectos que las fuerzas producen y otra a representarlas, a determinar y marcar su valor y otras de sus características. Como no se puede dibujar la atracción entre dos moléculas, en la figura 2 pusimos unas rayitas con flechas en las puntas y precisamente con ello nos adelantamos al estudio que haremos ahora. Porque en primer lugar, haremos el estudio de las fuerzas como vectores físicos, dejando los efectos de las mismas para capítulos próximos.

La fuerza como un vector

Un vector es una magnitud representada gráficamente por medio de un segmento de recta, de modo que la dimensión de ese segmento permita conocer el valor de la magnitud. Esta definición de vector no es estrictamente matemática, pero nos servirá en lo sucesivo para las aplicaciones que le daremos. Para representar una magnitud cualquiera por medio de un vector, hay que tener en cuenta cuatro datos que lo definen: punto de aplicación, dirección, sentido y magnitud.

La figura 9 muestra la forma de representar

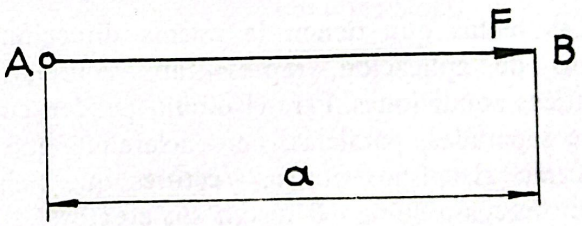


Fig. 9. – Una fuerza puede representarse por medio de un vector.

una fuerza con un vector. El punto de aplicación es el *A*, al cual se considera aplicada la fuerza *F*. Si fuera una locomotora tirando de un tren, el punto de aplicación sería el gancho en el que se asegura la cadena y la fuerza *F* sería la que realiza la locomotora. La dirección es la que determi-

na la recta *A B*, que en el caso del tren sería el recorrido del riel. Quiere decir que la fuerza *F* hace sus efectos en la dirección de la recta *A B*. El sentido se indica con una flecha en la punta del vector, la que se ve en el punto *B* de la figura. Quiere decir que el efecto de la fuerza se aplica desde *A* hacia *B* y no desde *B* hacia *A*, porque la dirección no es suficiente para aclararlo. En el caso de la locomotora, no basta conocer la posición del riel para saber hacia dónde se dirige la fuerza. Hay que saber si avanza a lo largo de ese riel hacia adelante o hacia atrás. La magnitud está dada por la longitud del vector, longitud que en la figura 9 está indicada con *a*. Así, si se trata de una fuerza de 40 Kg habría que adoptar una escala, como la que se usa para las representaciones gráficas, y dibujar la longitud que corresponda. Se diría, por ejemplo, que un cm equivale a 10 Kg y la fuerza de 40 Kg estaría representada por una longitud de 4 cm.

Resumiendo, un vector puede representar cualquier magnitud, como ser una fuerza, por ejemplo. Para representarla, se dibuja una raya, con un punto de aplicación, con una dirección determinada por la que seguiría el cuerpo arrastrado, por ejemplo; con un sentido, que indica hacia

Fig. 11. – Si los vectores tienen la misma dirección pero sentido contrario sus valores se restan.

dónde se dirige la fuerza o su efecto, y, finalmente, con una cierta dimensión, que en la escala elegida dará la magnitud de la fuerza o lo que sea el vector.

Composición de vectores de igual dirección

Las rectas que tienen la misma dirección y punto de aplicación, representan vectores de idénticas condiciones. Para el dibujo pueden colocarse separadas, paralelas, pero aclarando que se aplicarán al mismo punto. Vectores que tienen igual dirección suman o restan sus efectos, según coincidan o difieran sus sentidos. Aclaremos esto con ejemplos numéricos:

Sean dos vectores que representan fuerzas, como se ve en la figura 10. Uno de ellos representa una fuerza de 3 Kg y el otro una de 5 Kg aplicadas ambas en un mismo punto y siguiendo una misma dirección. Sería el caso de dos locomotoras tirando de un mismo tren. Para simplificar el dibujo las colocamos separadas y son las

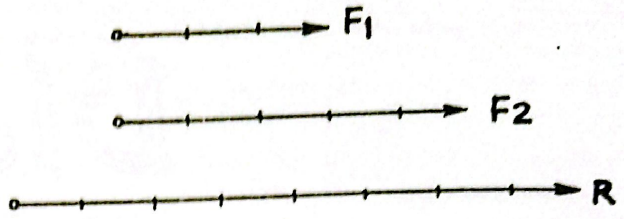
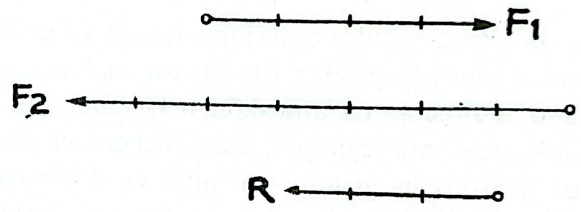


Fig. 10. – Los vectores paralelos que representan fuerzas aplicadas a un mismo punto suman sus valores.

rectas F_1 y F_2 de la figura. La escala adjunta permite dibujarlas con la longitud que tienen. Los sentidos de ambas fuerzas son coincidentes, pues las dos se dirigen hacia la derecha. Sus efectos se deben sumar aritméticamente, luego, la fuerza suma de las dos, llamada *resultante,* debe ser de 8 Kg y tendrá la misma dirección y sentido que las dos que se tenían como datos. En la figura se ha dibujado la resultante *R*, que tiene una longitud equivalente a 8 Kg.

Resumiendo, vectores que tienen igual dirección y sentido y que están aplicados al mismo punto, se suman directamente por Aritmética para dar el vector resultante. Lo mismo se resuelve si son dos o más los vectores *componentes.*

Supongamos el caso de vectores de igual dirección pero de sentidos contrarios. Sea el caso



de la figura 11, en la que aparecen dos fuerzas de 4 Kg y 7 Kg, respectivamente, que tienen la misma dirección y punto de aplicación, pero que hemos dibujado separadas. Los sentidos son contrarios, porque una se dirige hacia la derecha y otra hacia la izquierda. El vector resultante se obtiene, en este caso, por resta aritmética de los componentes, teniendo el resultado el signo o sentido del mayor. Así, en la figura 11 F_1 tiene 4 Kg y se dirige hacia la derecha, y F_2 tiene 7 Kg, es mayor, y se dirige a la izquierda. Luego, la fuerza resultante debe tener:

$$R = 7 - 4 = 3 \text{ Kg}$$

y dirigirse hacia la izquierda, tal como se ve en la figura. La hemos dibujado también separada para simplificar el dibujo, pues sabemos que tanto las fuerzas componentes como la resultante tienen el mismo punto de aplicación.

Resumiendo, vectores de igual dirección suman o restan sus efectos, según tengan el mismo

sentido o los haya con sentidos diferentes. Si hay varios, se va procediendo por partes. En todos los casos, la suma o resta se hace por las reglas de la Aritmética.

Para aclarar más aun el punto, daremos dos ejemplos más, con varios vectores, a fin de mostrar cómo se resuelve gráficamente el problema. Sea el caso de la figura 12. Se tienen tres vectores que representan fuerzas, F_1, F_2 y F_3. Todas tienen la misma dirección y sentido, luego la resultante debe ser la suma aritmética de las componentes. Colocando las tres fuerzas, una a continuación de la otra, se obtiene que el vector dado por el segmento $A\,B$ representa la resultante R, teniendo una longitud que es la magnitud del vector resultante en la misma escala en que se dibujaron las componentes. El sentido de la resultante es el mismo que el de las componentes.

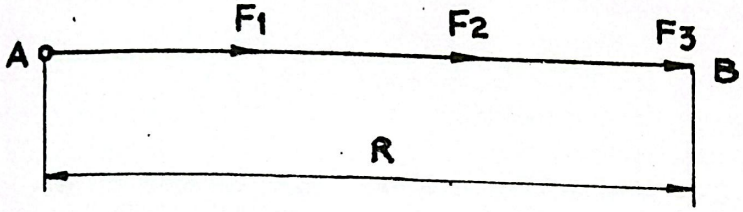


Fig. 12. – Para sumar vectores se los dibuja sobre una misma recta.

Sea ahora el caso de la figura 13, en la que aparecen dos fuerzas de un sentido y una de sentido contrario, pero todas con la misma dirección. Se suman primero las de un sentido, F_1 y F_2, cuya resultante parcial es la magnitud $A\,B$. Ahora hay que restar F_3, pues tiene sentido contrario. Luego, descontamos la magnitud $A\,C$ desde el extremo B, quedándonos una magnitud $D\,E$ que representa la resultante R. El sentido de la resultante se ve que coincide con el de las mayores, mejor dicho, con el de la suma de ellas.

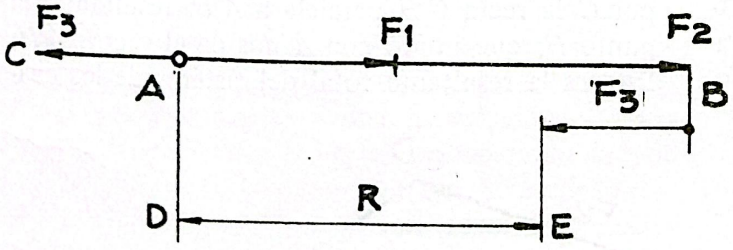


Fig. 13. – Al colocar varios vectores sobre una misma recta se suman o se restan según sus signos o sentidos.

Composición de vectores de direcciones distintas

Trataremos el caso de vectores de igual punto de aplicación, es decir, el caso que todos los vectores partan de un mismo punto, pues es el único sencillo y que tiene aplicación en la Física. Si dos vectores tienen distinta dirección, las rectas que los representan no pueden coincidir, sino que se dibujan como se ve en la figura 14. $A\,B$ y $A\,C$ son los dos vectores que representan fuerzas, por ejemplo. Más adelante veremos que los vectores pueden representar otras magnitudes que no sean fuerzas. El punto de aplicación de esos dos vectores es el A, y las direcciones las dadas por las dos rectas mencionadas. En los extremos B y C de las dos fuerzas se indica el sentido con una flechita.

Veamos cómo se suman vectores de direcciones distintas, suma que se llama *vectorial*, para diferenciarla de la suma aritmética vista anteriormente. Por el extremo B del vector F_1 se traza una recta $B\,D$, que es paralela a la $A\,C$. Por el extremo C del vector F_2 se traza una recta $C\,D$ que es paralela a la $A\,B$. Las dos rectas se han dibujado punteadas en la figura 14. Donde se cortan esas dos rectas obtenemos el punto D.

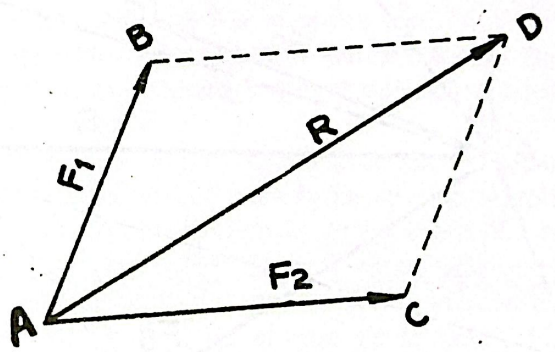


Fig. 14. – Suma gráfica de vectores que tienen el mismo punto de aplicación pero direcciones diferentes.

Uniendo D con A se obtiene la resultante de las dos fuerzas, o sea R. dada por el segmento $A\,D$. Si las dos fuerzas F_1 y F_2 tenían medidas tomadas en escala, a tantos Kg por cm, la resultante se lee en la misma escala.

Supongamos que en vez de dos vectores solos sean varios, como se ve en la figura 15. Todos están aplicados al mismo punto A y están dados por los segmentos $A\,B$, $A\,C$, $A\,E$ y $A\,G$ tomados en cierta escala, de una cierta cantidad de Kg por cm, por ejemplo. El procedimiento para hacer la

suma vectorial de esas fuerzas o lo que sean, es el siguiente: se procede parcialmente sumando dos de ellos, su resultante se suma con el tercero, la resultante de los tres con el cuarto y así sucesivamente. Aclaremos: Primero sumaremos vectorialmente F_1 con F_2, siguiendo las indicaciones dadas en la figura anterior. Para eso, trazamos una paralela a la recta $A\,C$ por el punto B y tenemos la $B\,D$; por el extremo de la recta $A\,C$, punto C, trazamos la $C\,D$, paralela a $A\,B$, y donde se cortan esas dos rectas que hemos dibujado punteadas, tenemos el punto D. Uniendo D con A, obtenemos la resultante parcial de F_1 y F_2, o sea el segmento $A\,D$, que llamamos $F_{1\text{-}2}$. Ahora debemos sumar esta resultante parcial con F_3, o sea hacer la suma vectorial de los segmentos $A\,D$ y $A\,E$. Para ello trazamos la recta $D\,F$ por el punto D, de modo que sea paralela a la $A\,E$ y por el punto E la recta $E\,F$, de modo que sea paralela a la $A\,D$. Donde se cortan $D\,F$ y $E\,F$ se obtiene el punto F, que unido con el A, nos da el segmento $A\,F$, que es la resultante de las tres fuerzas F_1, F_2 y F_3, por lo que lo llamamos $F_{1\text{-}2\text{-}3}$. Finalmente debemos sumar vectorialmente la resultante recién obtenida con la fuerza F_4, es decir sumar los vectores $A\,F$ con $A\,G$. Para ello trazamos por F la recta $F\,H$ paralela a $A\,G$ y por G la recta $G\,H$ paralela a $A\,F$, resultando el punto H, que unido con A nos da el vector $A\,H$. Esta es la resultante total del sistema de los cua-

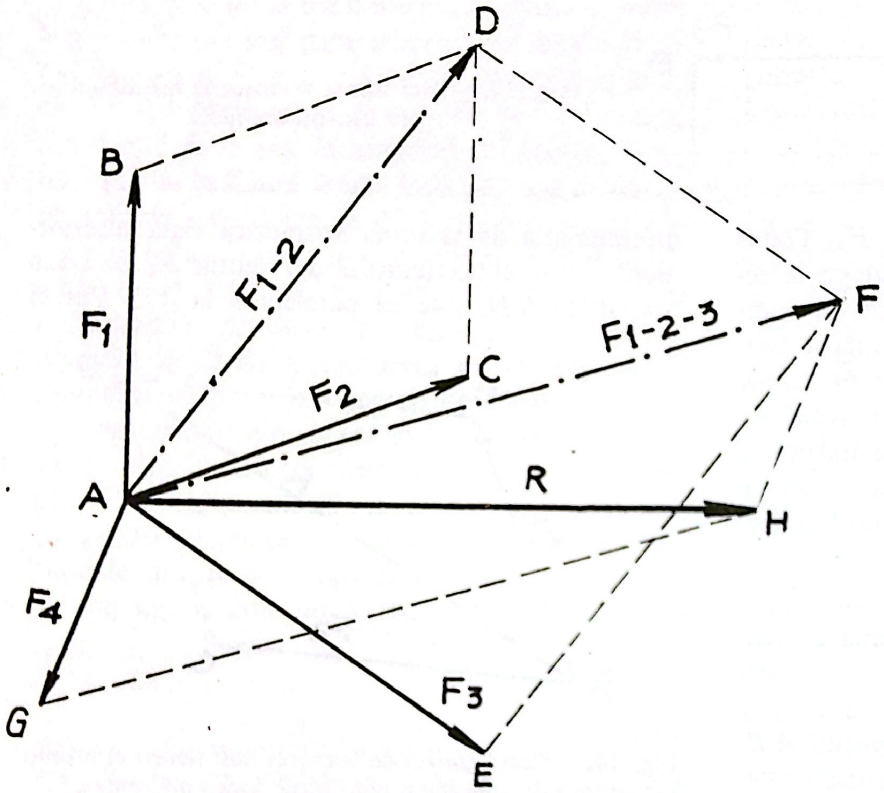


Fig. 15. – El mismo procedimiento de la figura 14, pero aplicado al caso de más de dos vectores.

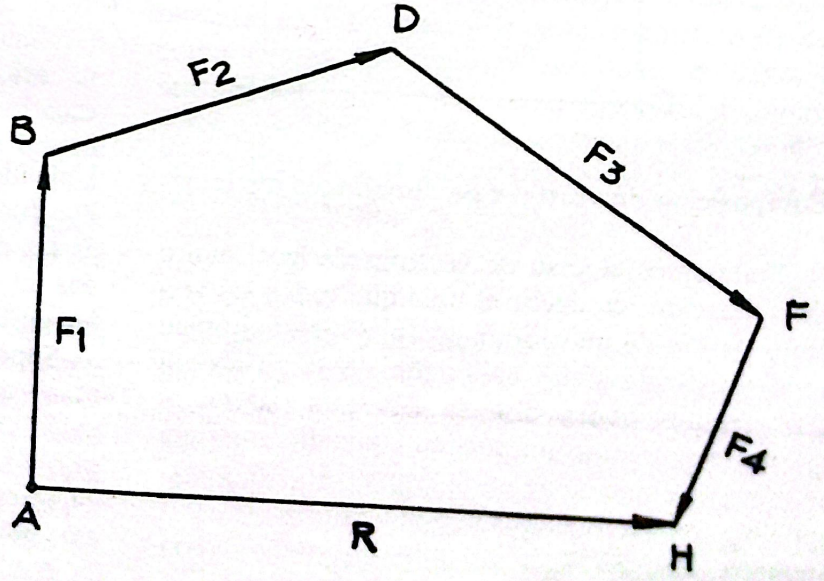


Fig. 16. – Procedimiento gráfico simplificado para resolver la suma de vectores dada en la figura 15.

tro vectores, o sea que $A\,H$, que llamamos R, medido en la misma escala utilizada para dibujar las fuerzas dadas, es la resultante total de esas cuatro fuerzas.

El procedimiento parece algo engorroso, pero admite una simplificación, utilizable cuando se trata de varios vectores. La figura 16 ilustra sobre la suma simplificada, en forma vectorial, de los mismos cuatro vectores de la figura 15. Para ello se toma uno de los vectores, el F_1 por ejemplo y por su extremo se traza el segundo, de modo que sea paralelo y tenga igual medida que el F_2 de la figura anterior. Es decir que la recta $B\,D$ de la figura 16 debe ser igual y paralela a la $A\,C$ de la figura 15. Por el punto D se dibuja el vector F_3 igual y paralelo al de la figura anterior, es decir que la recta $D\,F$ de la figura 16 debe ser igual y paralela a la $A\,E$ de la 15. Finalmente se traza por F el último vector, dado por la recta $F\,H$, que debe ser igual y paralelo a la $A\,G$ de la otra figura. Uniendo A con H se tiene la resultante total R pedida, en la misma escala en que se tomaron los cuatro vectores. $A\,H$ es esa resultante.

Como se ve, convendrá usar uno u otro procedimiento, según resulte más simple en cada caso particular, pues si bien el segundo parece más simple porque lleva menos rayas, el primero es más seguro, pues hay que hacer menos transportes de líneas paralelas.

Momento de una fuerza

El estudio de las fuerzas y sus efectos tiene un importante caso particular en la aplicación de las mismas a cuerpos que pueden girar. Es sabido que se originará un movimiento de rotación, como ocurre al accionar el volante de un automóvil. También sabemos que la velocidad de los puntos de un cuerpo que gira es tanto mayor cuanto más nos alejamos del eje. Esta consideración tiene su utilidad en este caso, como veremos.

Sea un cuerpo que puede girar alrededor de su eje o centro O (figura 17), al que le aplicamos una fuerza F en el punto A. Es fácil comprender que el efecto no será igual a cualquier distancia del centro O que se encuentre el punto A. Si para hacer girar al cuerpo hay que realizar un esfuerzo, éste será tanto menor cuanto más distante esté el punto A del O. Piénsese para ello en una tuerca colocada en su tornillo, a la cual se la quiere apretar; cuanto más largo es el brazo de la llave más fácil es realizar la operación, mientras que con una llave sin mango, no sería posible

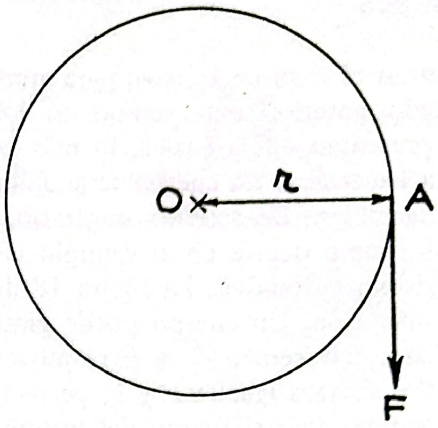


Fig. 17. – Una fuerza aplicada a un cuerpo con centro fijo lo hace girar.

hacerlo. Quiere decir que una fuerza determinada, de cierto valor, que apliquemos al mango de la llave, no nos dice si podrá apretar la tuerca; hay que especificar el largo del brazo o lo que es lo mismo, la distancia a que se aplicará esa fuerza desde la tuerca.

De resultas de las consideraciones anteriores, surge la idea de que cuando las fuerzas se aplican para realizar movimientos o esfuerzos de rotación, no basta hablar de las fuerzas, sino que hay que mencionar la distancia a que se aplican desde el centro de giro. En el caso de la figura 17, se mencionará el valor de la fuerza F y el *radio de giro* o *brazo de palanca r.*

Es evidente que cuanto mayor sea la fuerza o el radio mayor será el efecto, siendo lo mismo aumentar una cosa o la otra. Es decir que, para fijar condiciones, se deben considerar ambas cosas como cooperantes al esfuerzo; en otras palabras, se las debe multiplicar entre sí. Al producto del valor de la fuerza por el radio de giro se lo llama: *momento de la fuerza* y se lo refiere al centro de giro O. De modo que el momento de la fuerza F respecto del punto O será:

$$M = F\,r$$

Si se mide la fuerza en Kg y el radio en metros, el momento resulta un producto de Kg por m, o esa *Kilográmetros*, nombre que se adoptó para la unidad resultante. Si se mide la fuerza en Kg y el radio en cm, la unidad del momento es Kilogracentímetros. Ambas unidades se abrevian: Kgm y Kgcm, respectivamente.

Es así como, cuando se aplican fuerzas a un cuerpo para hacerlo girar, se habla del momento de esas fuerzas o del momento de giro, aunque es más común referirse a la cupla de giro, cuyo concepto explicamos en seguida.

Cupla de giro

Tanto en el caso de la llave para apretar tuercas, citado anteriormente, como en los demás que se presentan en la Física, lo más común es que para hacer girar un cuerpo se le apliquen dos fuerzas iguales y de sentido contrario, una en cada lado como ocurre en el ejemplo citado del volante de un automóvil. La figura 18 ilustra sobre esa ubicación. Un cuerpo puede girar alrededor de su eje o centro *O*, y para moverlo se le aplican dos fuerzas iguales *F* y *F*, pero con sentidos contrarios, pues si fueran del mismo sentido el cuerpo no giraría. Las distancias al centro son también iguales. Piénsese en el ejemplo de la tuerca y se verá que la llave tiene dos puntos de ataque sobre la tuerca, a la misma distancia de su centro. Cualquiera de las fuerzas *F* de la figura 18 hace girar al cuerpo en el sentido de las agujas del reloj.

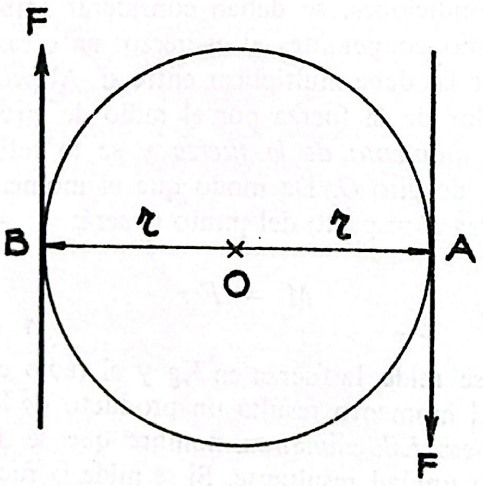


Fig. 18. - Concepto gráfico de la cupla de giro o torca.

Si calculamos el momento de giro producido por las dos fuerzas *F*, cada una de ellas ocasionará un momento dado por el producto de *F* por el radio *r* y en total, como los dos momentos se ayudan, es decir, se suman, se tiene:

$$M = 2Fr$$

O lo que es lo mismo, ya que el radio multiplicado por 2 da el diámetro o distancia *BA* entre las dos fuerzas, se tendría:

$$M = Fd$$

Ahora bien, se llama *cupla de giro, par de fuerzas* o, simplemente *cupla (torca)* al producto escrito en último término, del valor de las fuerzas por la distancia entre las mismas. Se ve claro que la cupla no es otra cosa que el momento de giro que habíamos definido anteriormente, o sea que, para los casos que se nos presenten, diremos que el momento de giro, o la cupla de giro, o simplemente la cupla, estará dada por el producto de la magnitud de la fuerza por la distancia que media entre ambas, si son dos las aplicadas, o por el radio, si es una sola. A la cupla la llamaremos también *M*, y la medimos en Kgm.

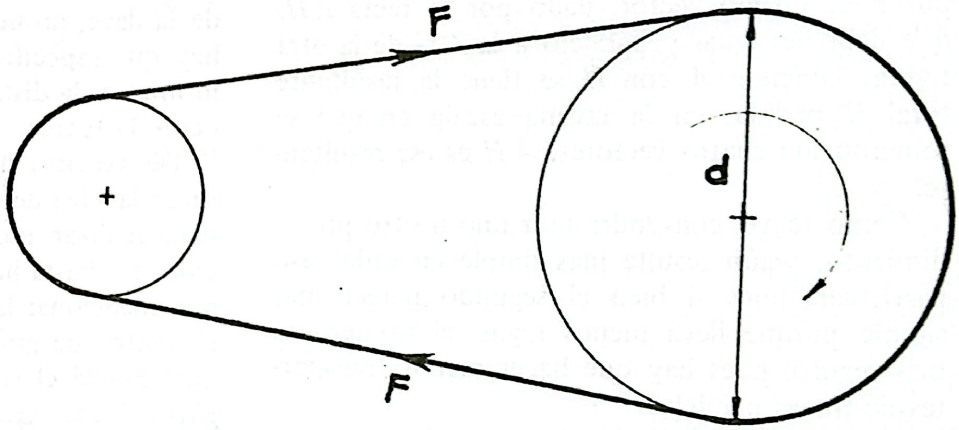


Fig. 19. - Un ejemplo práctico de aplicación de la cupla.

Veamos un caso de aplicación de los conceptos vertidos. La figura 19 muestra un acoplamiento de dos poleas mediante una correa, cosa bien conocida por los mecánicos. Si la polea grande es la impulsora, la parte superior de la correa tira en el sentido marcado y la parte inferior en el otro. El diámetro de la polea mayor es *d*. La cupla que suministra esa polea está dada por:

$$M = Fd$$

De acuerdo con la definición dada. La polea chica, en cambio, tiene una cupla menor, ya que siendo igual la fuerza que tiene la correa y siendo menor su diámetro, la cupla resultará tanto menor como lo sea el diámetro citado con respecto al de la polea grande.

Descomposición de fuerzas

Hemos visto cómo dos o más fuerzas de distintas direcciones pueden componerse para dar una resultante y que podía obtenerse la dirección, sentido a valor de la resultante del conjunto de fuerzas. También puede realizarse el proceso

inverso, es decir, descomponer una fuerza en dos o más fuerzas componentes. Mediante el procedimiento vectorial estudiado podrá determinarse la dirección, sentido y magnitud de esas componentes.

Para aclarar la idea veamos la figura 20, que muestra una fuerza F dada por el vector $A\,B$ que fija su punto de aplicación (A), su dirección, magnitud y sentido. Se desea reemplazar esa fuerza por otras dos que tengan las direcciones $A\,C$ y $C\,B$. La descomposición vectorial se realiza trazando por el punto A una recta que pase por el punto C y por el punto B otra recta que pase por el punto C. Ambas rectas dè cortan en el punto C que nos fija las magnitudes de las dos fuerzas componentes. Ahora, en un gráfico aparte hemos dibujado dos vectores concurrentes, F_1 y F_2, que son paralelos a las rectas $A\,C$ y $C\,B$ respectivamente y que tienen sus mismas longitudes. Estos dos vectores representan a dos fuerzas que equivalen exactamente a la fuerza F y sus magnitudes resultan dibujadas en escala; sus direcciones y sentidos son los que da la figura 21.

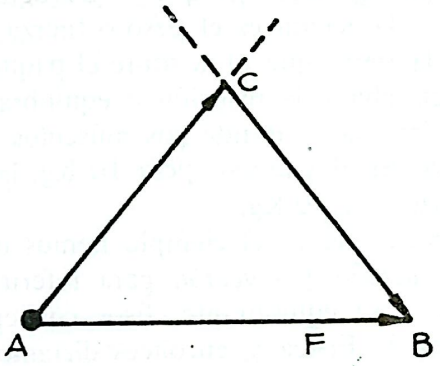


Fig. 20. – Una fuerza puede descomponerse en dos fuerzas con direcciones dadas mediante el diagrama vectorial.

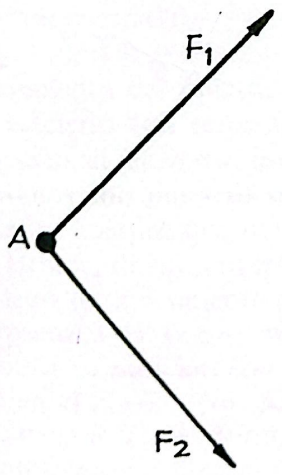


Fig. 21. – Estas son las dos fuerzas que reemplazan a la F de la figura 20.

En la práctica este problema tiene numerosas aplicaciones. Veamos un ejemplo concreto representado en la figura 22. Un vehículo atascado en un pantano debe ser arrastrado desde fuera del camino porque el barro impide colocarse delante de él. Se ata una soga al vehículo y se la pasa por un árbol cercano para tirar de ella. La dirección de la fuerza ejercida no es la ideal y queremos saber qué parte de esa fuerza se aprovecha para arrastrar al vehículo y qué parte no se aprovecha. La solución es descomponer la fuerza de arrastre en las direcciones $A\,C$ (camino) y $C\,B$ perpendicular a la anterior, tal como lo muestra el gráfico realizado en la figura 23. Si la fuerza realizada con la soga es de 70 Kg por ejemplo, en

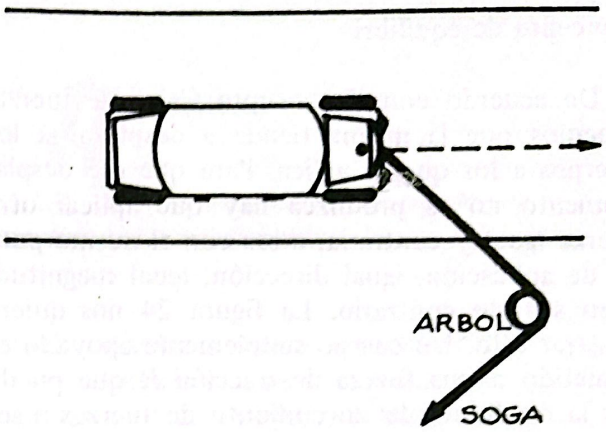


Fig. 22. – Cuando la fuerza no tiene la dirección ideal solo se aprovecha una parte de ella para conseguir el efecto buscado.

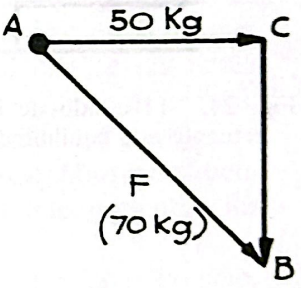


Fig. 23. - Diagrama vectorial para el caso de la figura 22.

la escala en que la hemos dibujado y dada la construcción gráfica resulta que la fuerza en la dirección $A\,C$ es de 50 Kg; hay otra fuerza de unos 50 Kg que es perpendicular al camino y que no se aprovecha. En este ejemplo hay que dejar de lado la consideración de que el vehículo tenderá a desplazarse lateralmente, porque se supone que hay una huella en el camino que lo impide; además, no debe caerse en el error de pensar que si resultaron dos fuerzas de 50 Kg, y el hombre tiró con una fuerza de 70 Kg, ¿de dónde salieron los 30 Kg sobrantes? – No hay sobrante, hay reemplazo de una fuerza por dos componentes que equivalen a la primera en sus efectos, pero no deben buscarse operaciones aritméticas en los procesos vectoriales pues se cae en error.

Concepto de equilibrio

De acuerdo con el concepto físico de fuerza, sabemos que la misma tiende a desplazar a los cuerpos a los que se aplica. Para que ese desplazamiento no se produzca hay que aplicar otra fuerza igual y contraria, o sea con el mismo punto de aplicación, igual dirección, igual magnitud, pero sentido contrario. La figura 24 nos quiere mostrar esto. Un cuerpo simplemente apoyado es sometido a una fuerza de tracción *R* que puede ser la resultante de un conjunto de fuerzas o ser única. Para evitar que el cuerpo se desplace hay que aplicar otra fuerza igual y contraria *E*, que equilibre la acción de *R*, de ahí el nombre de *equilibrante* que recibe.

Si queremos saber cuál será el resultado de la acción de *R* y *E* combinadas realizaríamos el procedimiento vectorial de la figura 11, pero considerando dos fuerzas iguales y de sentido contrario. El resultado es cero o sea que la resultante de esas dos fuerzas es nulo. Así podemos decir que cuando un sistema de fuerzas da una resultante nula, el sistema está en equilibrio.

Ya tenemos la definición de equilibrio; cuando un cuerpo no está sometido a ninguna fuerza está en equilibrio, pero ese estado puede ser consecuencia de que habiendo fuerzas actuantes, las mismas formen un sistema con resultante nula.

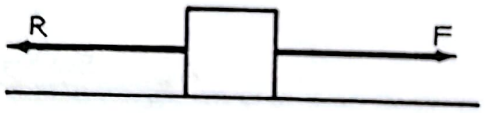


Fig. 24. – El estado de equilibrio es cuando la fuerza actuante está equilibrada por otra igual y contraria.

En el ejemplo simple de la figura 24 dijimos que una fuerza *R* tiraba del cuerpo hacia la izquierda, luego la equilibrante debía tirar hacia la derecha. Lo mismo sería si la fuerza *R* empujara en vez de tirar, caso de la figura 25; la equilibrante *E* debería empujar hacia la izquierda para contrarestar la acción de *R*. Pero hay numerosos ejemplos en la vida diaria donde las fuerzas no se ven pero el equilibrio se produce. Pongamos el caso de una persona que lleva un paquete colgando de su mano; hay dos fuerzas iguales y contrarias en sus sentidos, ya que el paquete está en equilibrio: la acción es el peso o fuerza de atracción de la tierra que obra sobre el paquete tirándolo hacia abajo; la reacción o equilibrante es la tensión del brazo, donde sus músculos tiran hacia arriba. Si el paquete pesa 10 Kg, la tensión en el brazo será 10 Kg.

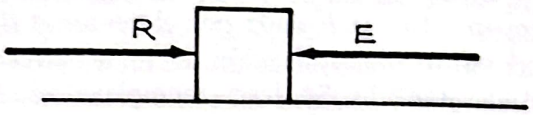


Fig. 25. – Las fuerzas en equilibrio pueden empujar en lugar de tirar del cuerpo.

Obsérvese que en el ejemplo hemos usado los términos *acción* y *reacción* para referirnos a la fuerza y a su equilibrante. Esos conceptos son usuales en la Física y entonces diríamos que el equilibrio se produce cuando hay igualdad entre la acción y la reacción; debe entenderse que esa igualdad incluye punto de aplicación, magnitud y dirección, pero con respecto al sentido, queda sobreentendido que la acción y la reacción son de sentidos contrarios.

Día 4

Ahora conocemos las fuerzas y sabemos que ellas pueden producir movimientos. Podríamos encarar de inmediato la evaluación de tales movimientos, pero es mejor que estudiemos previamente el desplazamiento de los cuerpos en si, sin vincularlos con los agentes que los producen. La Cinemática es la parte de la Física que estudia los movimientos y más adelante combinaremos los temas de la jornada anterior con los de la presente para relacionar causas con efectos.

Hay diversos tipos de movimiento según los mismos sigan una trayectoria recta o curva, según el avance del móvil se haga en forma uniforme o con cambio de régimen y según el desplazamiento se cumpla en forma rítmica o no. Como se ve, tenemos por delante una cantidad de temas a tratar en la presente jornada y la abordaremos de inmediato.

ESTUDIO DE LOS MOVIMIENTOS – CINEMATICA

Los cuerpos en la naturaleza pueden estar en reposo o en movimiento pero si nos atenemos a que el globo terraqueo se mueve en el universo, no habría entonces ningún cuerpo en reposo sobre la tierra, ya que la acompañan en su propio movimiento. Entonces, se ha fijado la condición hipotética de que la tierra está fija y todo cuerpo que cambia su posición con respecto a ella se dice que está en movimiento. La hipótesis dada permite que la Física estudie los movimientos y sus características ya que se considera que el observador, o sea la persona que está mirando el movimiento del objeto, está en reposo; este reposo es cierto con respecto a la tierra pero no con respecto al universo, pero esto último no lo advertimos con nuestros sentidos si solamente miramos los cuerpos que nos rodean.

Hemos dicho entonces que un cuerpo está dotado de movimiento si su posición cambia con respecto a la tierra, pero ¿un trompo que gira cambia su posición con respecto al punto de apoyo en el piso? No, pero los distintos puntos de la materia que lo forman están cambiando constantemente de posición al girar sobre su eje. Entonces, basta que un punto de un cuerpo cambie de posición para decir que ese cuerpo está en movimiento. El estudio del movimiento se llama *cinemática.*

Clases de movimiento

Por el momento no nos ocuparemos de las causas del movimiento sino de éste en si mismo; hemos mencionado ya que si una fuerza actúa sobre un cuerpo lo desplaza o, por lo menos, tiende a hacerlo, pero este tema será motivo de estudio en capítulos posteriores. Ahora nos ocuparemos de las características que presentan los movimientos fundamentales.

Un cuerpo, no importa su forma o tamaño, puede moverse de muchas maneras pero las que tienen mayor importancia en la Física son tres: el de traslación, el de rotación y el oscilatorio. Si un cuerpo se traslada de un lugar a otro tenemos una traslación; si gira alrededor de un centro o eje, se trata de una rotación; y si va y viene con respecto a un punto fijo estamos frente a una oscilación.

El movimiento de traslación puede seguir una trayectoria recta o curva, pero siempre se puede considerar un tramo chico de esa curva en la cual el desplazamiento se asimile a una dirección rectilínea; por este motivo este tipo de movimiento se estudia y denomina como *rectilíneo.*

El movimiento de rotación o rotatorio se cumple alrededor de un eje, el cual tiene una posición fija con respecto a la tierra. En el caso de

una rueda chata que gira, ese eje puede confundirse con un punto fijo o centro de giro. En todos los casos este movimiento se llama *circular.*

El tercer tipo de movimiento tiene también un punto fijo pero el cuerpo no gira alrededor de él sino que se aleja y se acerca en forma rítmica. El ejemplo más clásico es el del péndulo, que es un cuerpo colgado de un centro fijo mediante un hilo; el cuerpo cumple un movimiento de vaivén que es el que se llama *oscilatorio.* Otro caso sería el de la amortiguación de un coche. La carrocería no está fija a los ejes de las ruedas sino acoplada a ellos mediante resortes. Si las ruedas sufren un movimiento brusco por un bache, la carrocería adquiere un movimiento oscilatorio o vibratorio que en la práctica se elimina rápidamente mediante amortiguadores. La figura 26 nos muestra en forma sintética que el punto fijo de este movimiento es la posición central o media de la carrocería y la oscilación se cumple mediante ascensos y descensos rítmicos de la misma entre dos posiciones extremas, todo ello debido a la acción del resorte de suspensión.

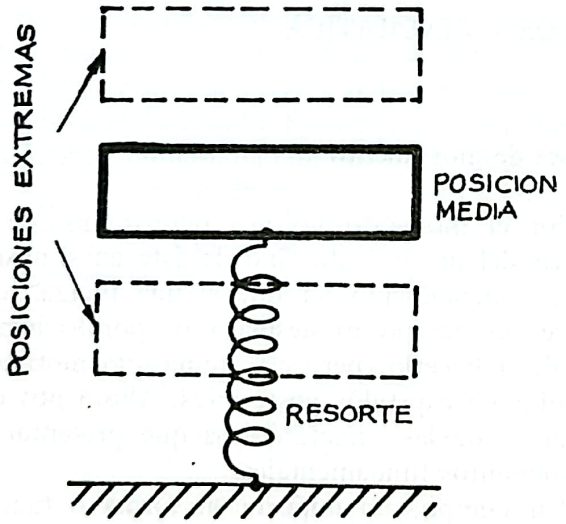


Fig. 26. Movimiento vibratorio ocasionado por un resorte.

El movimiento del péndulo es el ejemplo de la clásica oscilación mientras que el del resorte suele llamarse *vibración.* Hay todavía otro ejemplo que toma el nombre de movimiento *ondulatorio* porque en el mismo el cuerpo no es uno solo sino una serie y el movimiento se propaga a lo largo de la serie. Para ilustrar sobre este caso veamos la figura 27 que muestra una hilera de bolitas. Si golpeamos la primera de la izquierda, la elasticidad de la misma la hará chocar con la segunda y volverá a su posición por el rechazo de esa segunda; en esta forma con avances y retrocesos pequeños, el movimiento se propaga a lo largo de

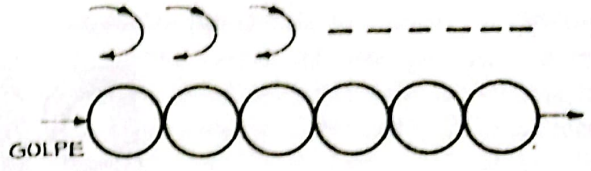


Fig. 27. Movimiento ondulatorio producido por el impulso aplicado a una hilera de bolitas.

la fila y llega a la última, la cual sufre el efecto del golpe inicial. Claro que en esto consideramos las cosas en forma teórica, porque en un capítulo próximo veremos que hay amortiguamiento de los movimientos por pérdidas de energía, pero eso no podemos mencionarlo todavía. El caso es que ese movimiento vibratorio que se propaga a través del conjunto toma el nombre de ondulatorio.

Podemos adelantar que si en lugar de bolitas consideramos las moléculas del aire, y producimos una excitación en una de ellas en un lugar, el fenómeno se propagará mediante choques vibratorios de todas las moléculas formándose lo que se conoce como *ondas.* Si la excitación es una vibración rápida molecular, tenemos la onda sonora; si es un fenómeno electromagnético, tendremos la onda de radio o de televisión; si es un fenómeno térmico o de incandescencia, tendremos las ondas de calor o de luz. Cada uno de estos casos será motivo de estudio detallado en su oportunidad, pero como podemos apreciar, los movimientos ondulatorios tienen en Física una importancia capital.

Hay otros movimientos de los cuerpos como los que se cumplen en forma desordenada, los impactos deformantes, etc. Para este capítulo dejamos los tres clásicos que enumeramos al principio, con la salvedad hecha de que el de traslación lo consideraremos rectilíneo. Pasemos al estudio de los mismos.

Movimiento rectilíneo uniforme

Es el que se cumple en una línea recta. Como tal puede considerarse el caso de un ferrocarril, un automóvil, una persona caminando o corriendo, etc., pues no es estricto que la trayectoria sea perfectamente recta, ya que se considera como tal si tuviera una pequeña curvatura. Los conceptos fundamentales a considerar son: la velocidad, el espacio, el tiempo y, en el caso de ser variable la velocidad, la aceleración o la retardación.

La *velocidad* es el cociente entre el espacio o distancia recorrida y el tiempo empleado en recorrerla. Así, un tren que recorre 200 Kilómetros

en dos horas, se dice que ha cumplido una velocidad de:

$$v = \frac{d}{t} = \frac{200}{2} = 100 \text{ Km/h}$$

Aunque todavía no nos hemos referido a la unidad que deba usarse, ha surgido de la ecuación o relación anterior que la velocidad se expresa en Km/h. En realidad, en la Física no se emplea tal unidad, porque en movimientos que se cumplen en trayectos reducidos, como son las máquinas o mecanismos, resultaría muy grande. Se acostumbra a usar las unidades que resultan de medir la distancia en metros o en centímetros, y el tiempo en segundos o en minutos. Resulta así que podrían ser unidades de velocidad:

$$\frac{m}{s} \; ; \; \frac{m}{min} \; ; \; \frac{cm}{s} \; ; \; \frac{cm}{min}$$

aunque la más común es el cm/s o, a lo sumo, el m/s.

De la ecuación de la velocidad surge que el espacio o distancia d (figura 28) es el camino recorrido por el cuerpo en su movimiento y se lo toma en cm o en m. El tiempo t se toma generalmente en segundos. El Algebra nos da el camino para calcular la distancia recorrida cuando se conoce la velocidad y el tiempo, pues se deduce de la fórmula anterior que bastaría multiplicar v por t; también podría calcularse el tiempo tardado en recorrer cierta distancia a una velocidad determinada, dividiendo esa distancia por la velocidad (d/v).

Pasemos entonces a las expresiones matemáticas que nos permitirán calcular la distancia o espacio recorrido y el tiempo necesario para recorrerlo. De acuerdo a lo dicho se tiene que el espacio o distancia d vale:

$$d = v\,t$$

Y según las unidades tomadas para v y t resulta la de la distancia d. Por ejemplo, si un coche circula a 50 Km/h, se pregunta qué distancia recorrerá en 3 horas y el resultado será 150 Km.

El tiempo necesario para recorrer una cierta distancia d a una velocidad v resulta de la operación:

$$t = \frac{d}{v}$$

y se harían las mismas consideraciones acerca de las unidades. En el ejemplo anterior, el coche que camina a 50 Km/h necesita 3 horas para recorrer 150 Km.

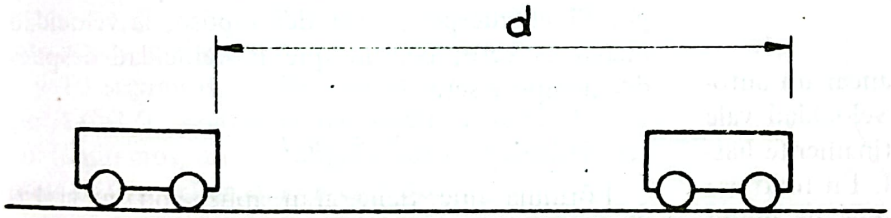


Fig. 28. Camino recorrido por un cuerpo en movimiento uniforme.

Es interesante hacer un gráfico que muestre la velocidad del cuerpo en el movimiento uniforme al transcurrir el tiempo. La figura 29 nos muestra tal gráfico, donde en el eje horizontal tomamos los tiempos en segundos, que es la unidad racional en Física y en el eje vertical tomamos las velocidades en m/s. Como el movimiento es uniforme, la velocidad estará representada por una

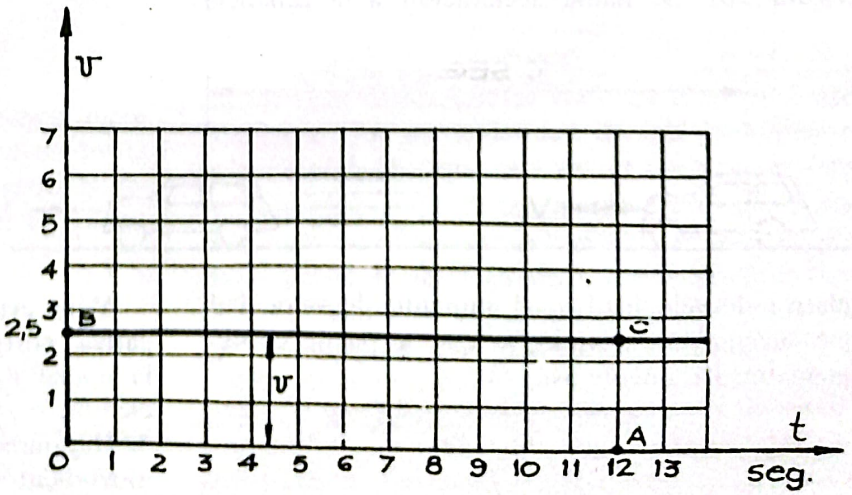


Fig. 29. Gráfica de la velocidad en el movimiento uniforme.

línea recta horizontal. En la figura hemos puesto como ejemplo la gráfica de una velocidad de 2,5 m/s.

Pero de ese gráfico podemos sacar una interesante conclusión. Supongamos que nos interesa conocer la distancia recorrida por el móvil en 12 segundos cuando mantiene la velocidad ejemplificada en la figura 29. En el instante inicial O la velocidad está dada por el punto B y en el instante A (12 segundos) la velocidad está dada por el punto C que tiene el mismo valor, ya que el movimiento es uniforme. Pero observemos el rectángulo $O\,B\,C\,A$ y calculemos su superficie:

$$S = (OB) \times (OA)$$

pero la magnitud $O\,B$ equivale a la velocidad v y la magnitud $O\,A$ equivale al tiempo t, luego la superficie S no es otra cosa que la distancia recorrida.

Aquí está la interesante conclusión a que nos referimos: en el diagrama de velocidades, la superficie encerrada por la gráfica de velocidad y el eje horizontal, limitada por los instantes inicial y final considerados, representa a la distancia recorrida por el móvil.

Movimiento acelerado o retardado

Supongamos el momento de arrancar un automóvil. Parte del reposo donde la velocidad vale cero y va cobrando velocidad paulatinamente hasta que llega a la de marcha normal. En todo ese intervalo la velocidad ha sido variable, de modo que no se puede hablar de movimiento uniforme, sino que se tratará de uno acelerado. ¿Cómo se puede expresar la velocidad en tal caso, si ha estado variando a cada instante? Aquí entra el concepto de *aceleración,* que puede expresarse así:

Sea en un instante dado, v_1 la velocidad del móvil; una fracción de tiempo más tarde, fracción que llamamos t, la nueva velocidad es v_2 (figura 30). Se llama aceleración a la ganancia relativa de velocidad, o al aumento de velocidad que sucede por segundo, lo que se puede expresar matemáticamente así:

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t}$$

donde se ha llamado a a la aceleración. Cabe preguntarse qué unidad tendrá la aceleración y si observamos la fórmula anterior, donde el numerador da el aumento de velocidad en m/s y el denominador da el intervalo de tiempo, en segundos, al dividir ambas cosas resulta que:

$$a \text{ se mide en } \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

que puede parecer una unidad rara, pero que debe interpretarse como una cantidad de m/s aumentados por cada segundo, o sea una velocidad aumentada por cada segundo.

Si observamos la fórmula anterior y pasamos al primer miembro el tiempo primero y después la velocidad inicial v_1 cambiándole el signo como corresponde, se obtiene que la velocidad final es igual a la inicial más el producto $a\,t$:

$$v_2 = v_1 + a\,t$$

que es la ecuación fundamental del movimiento acelerado y que dice que si en un tiempo dado la aceleración se ha mantenido uniforme, la velocidad al final del intervalo está dada por la inicial más el producto de esa aceleración por ese tiempo. Si el cuerpo partió del reposo, la velocidad inicial es cero, con lo que la velocidad después del tiempo t será:

$$v = a\,t$$

Fórmula que tiene gran aplicación en la Física.

Si el movimiento es retardado en lugar de acelerado, como sería el caso de frenar un vehículo en lugar de arrancar, valen las mismas ecuaciones, pero considerando a la aceleración con signo negativo, pues representa una pérdida de velocidad en lugar de una ganancia. La expresión de la pérdida relativa de velocidad por segundo es:

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t}$$

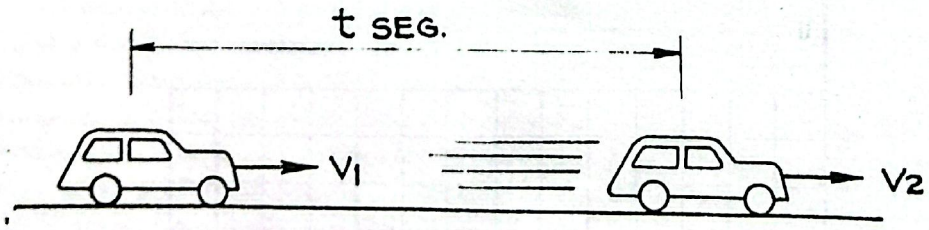


Fig. 30. Un cuerpo móvil que aumenta su velocidad está animado de un movimiento acelerado.

Y es evidente que resulta una aceleración negativa, porque la velocidad final v_2 es menor que la inicial v_1, ya que el movimiento se va reduciendo.

Hagamos ahora el gráfico de la velocidad en el movimiento variado, cosa que vemos en la figura

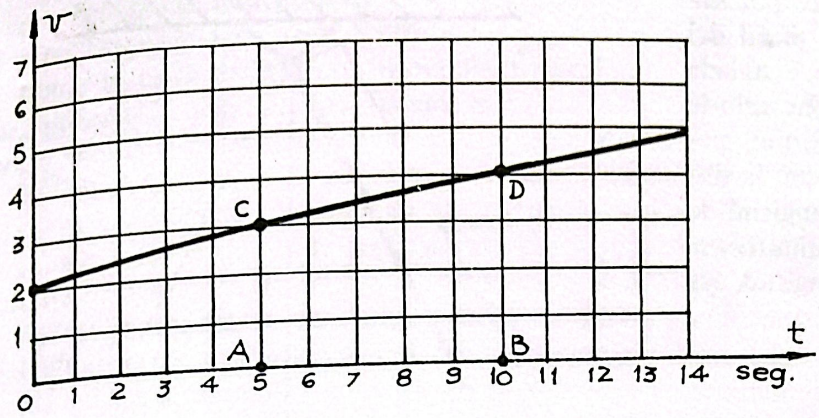


Fig. 31. — Gráfica de la velocidad en el movimiento acelerado.

31. El caso general es cuando hay una velocidad inicial, la que sufre los incrementos de la aceleración al correr el tiempo. En la gráfica dibujada la velocidad inicial es de 2 m/s y a los 5 segundos el valor de la velocidad pasó a 3 m/s. Luego la aceleración en este ejemplo vale:

$$a = \frac{3 - 2}{5} = 0{,}2 \text{ m/s}^2$$

Si se quiere determinar el espacio recorrido, sabemos que él estará representado por el área encerrada por la gráfica de la velocidad. Si nos interesa la distancia recorrida entre los instantes 5 y 10 segundos, el área encerrada será el trapecio *A C B D*, ya que el movimiento acelerado ya no tendremos un rectángulo como superficie representativa del espacio recorrido.

El área de un trapecio es el producto de la semisuma de las bases por la altura. En este caso tenemos:

$$S = \frac{AC + BD}{2} AB$$

Pero *A C* es la velocidad considerada inicial en el lapso elegido, *B D* es la velocidad final y *A B* es el tiempo del ese período, luego tenemos:

$$d = \frac{v_1 + v_2}{2} t$$

Que es la fórmula para calcular la distancia recorrida en el movimiento variado. Analizando la fórmula, vemos que el quebrado representa la velocidad media, la cual multiplicada por el tiempo nos da la distancia recorrida.

Movimiento circular

Si la trayectoria que sigue un móvil es una circunferencia, como sería el caso de atar una piedra a un hilo y hacerla girar, el movimiento se llama circular o de rotación. No escapa al lector la importancia que tiene su estudio, pues la mayor parte de las máquinas en la Electricidad y la Mecánica tienen movimientos de rotación.

Sea un cuerpo *A* (figura 32) que se mueve alrededor de un centro *O*, siguiendo una circunfe-

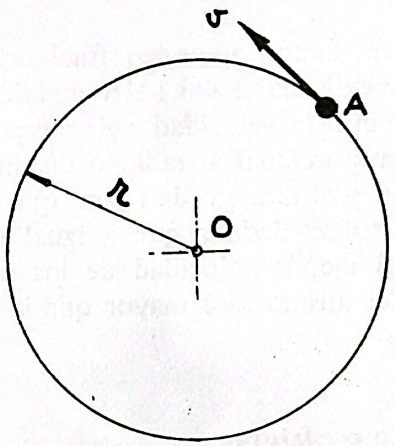


Fig. 32. — Un cuerpo que gira alrededor de un centro tiene un movimiento circular o de rotación.

rencia de radio *r*. La distancia de *A* hasta el centro de giro es *r* precisamente. El cuerpo *A* está animado de una cierta velocidad *v*, que es siempre el cociente entre la distancia recorrida y el tiempo empleado en recorrerla:

$$v = \frac{d}{t}$$

en idéntica forma que se trató en el movimiento rectilíneo. La particularidad de este movimiento está en el hecho que rara vez se tiene como dato la velocidad o la distancia recorrida, conociéndose más comúnmente la cantidad de vueltas que da el móvil en un segundo o en un minuto. Hay aparatos llamados *taquímetros*, que aplicados al eje *O* permiten leer directamente el número de vueltas o revoluciones que da ese eje por minuto (r.p.m.). Se conviene en llamar *n* a esa cifra:

$$n \text{ (r.p.m.)}$$

Conociendo el número de revoluciones por minuto se puede determinar la velocidad lineal del cuerpo A, siempre que se sepa a qué distancia está del centro del eje O. En efecto, aplicando la expresión general de la velocidad uniforme, podríamos calcularla teniendo en cuenta que la distancia recorrida en una vuelta sería la longitud de la circunferencia de radio r, y en un minuto esa distancia sería igual a n veces esa longitud, ya que A da n vueltas al minuto. Se tiene:

longitud de la circunferencia: $l = 2 \pi r$

distancia recorrida en un minuto: $d = l n = 2 \pi r n$

Y como la velocidad es el cociente entre la distancia y el tiempo y teniendo en cuenta que un minuto equivale a 60 segundos, se tiene:

$$v = \frac{d}{t} = \frac{2 \pi r n}{60} = 0{,}1047\ r\ n$$

Donde el factor numérico final equivale a la operación indicada $2 \times 3{,}1416$ dividido por 60. De modo que la velocidad del cuerpo es directamente proporcional al radio o distancia al centro de giro y al número de r.p.m. que da el cuerpo. De esto se deduce que a igual número de vueltas del eje, la velocidad de los puntos más alejados del mismo será mayor que la de los más cercanos.

Movimiento oscilatorio

Para estudiar este tipo de movimiento utilizaremos el ejemplo más conocido y más simple, que es el del péndulo, representado en la figura 33. Se trata de un centro fijo C del cual pende un hilo con un peso en el extremo que puede ser una bolita metálica u otra cosa. El hilo tiene una longitud l y en reposo ocupa una posición vertical, estando el peso en el punto O.

Si desplazamos la bolita hasta la posición A que está apartada una distancia d de la vertical de reposo y la soltamos, se inicia el movimiento pendular, pues la bolita se desplaza hasta B, vuelve a A y así siguiendo. Si pensamos que en los puntos extremos A y B el movimiento se detiene y que cada vez que la bolita pasa por O su velocidad es máxima, nos daremos cuenta que se trata de un movimiento variado.

Desde A hasta O el movimiento es acelerado, ya que parte del reposo y va cobrando velocidad creciente. Desde O la bolita va perdiendo velocidad hasta que se detiene en B; ese es un movimiento retardado. Desde B sucede lo mismo pero

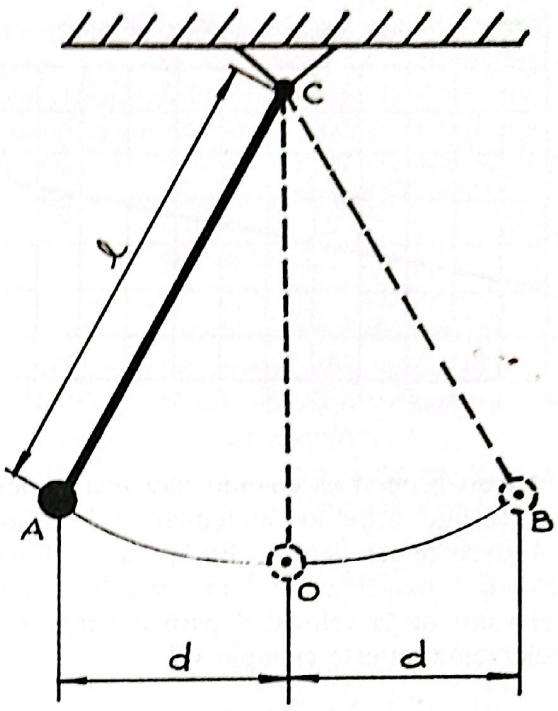


Fig. 33. Movimiento oscilatorio pendular de un cuerpo suspendido de un centro fijo.

con sentido contrario, de modo que podríamos considerar que si el desplazamiento hacia la derecha es positivo, el que ocurre hacia la izquierda será negativo. Resultaría interesante hacer una gráfica de este movimiento.

Para lograr ese objeto improvisamos el aparato que se ve en la figura 34. Consiste en dos rodillos que tienen arrollada una cinta de papel; mediante un motorcito hacemos girar al rodillo inferior para que arrastre a la cinta de papel que se va arrollando en él. A la bolita del péndulo le colo-

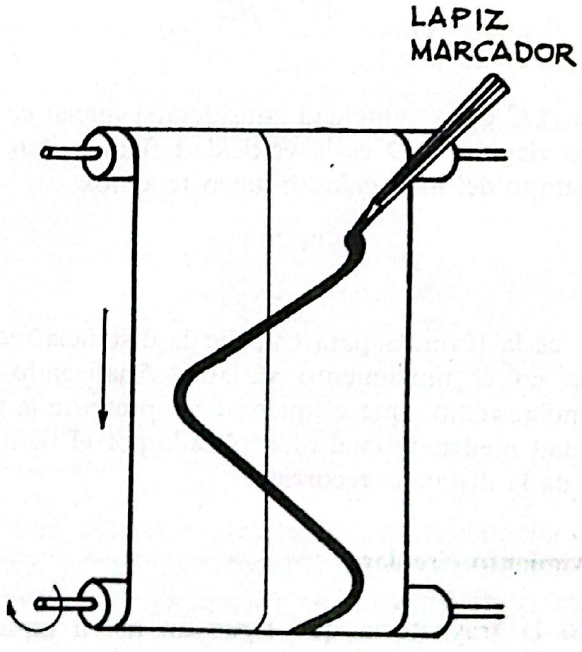


Fig. 34. Forma de obtener la gráfica del movimiento pendular.

camos una punta marcadora que irá marcando en el papel las posiciones de la bolita.

Como la cinta avanza con movimiento uniforme, podemos considerar ese desplazamiento como el transcurrir del tiempo. Al oscilar el péndulo va dibujando sobre el papel una curva; si ese papel es cuadriculado y después de dibujado lo sacamos, veremos que el trazo realizado es el que muestra la figura 35. Tal curva corresponde a una oscilación completa y se llama *senoide* o sinusoide. Las otras oscilaciones del péndulo trazan curvas iguales a esa.

El otro detalle característico es la duración de un ciclo completo del fenómeno, tiempo al que se llama *período*. En el gráfico, como los tiempos se toman en el eje horizontal, el período marca la longitud de un ciclo u oscilación completa; en la figura 35 hemos marcado el período *T*.

En los fenómenos oscilatorios suele reemplazarse el período por otra cifra que es la cantidad de ciclos o períodos que suceden o se cumplen en un segundo, cantidad que se denomina *frecuencia*. Para saber cuantos períodos hay en un segundo debemos dividir la unidad por *T* y obtenemos la frecuencia a la que se le asigna la letra *f*

$$f = \frac{1}{T}$$

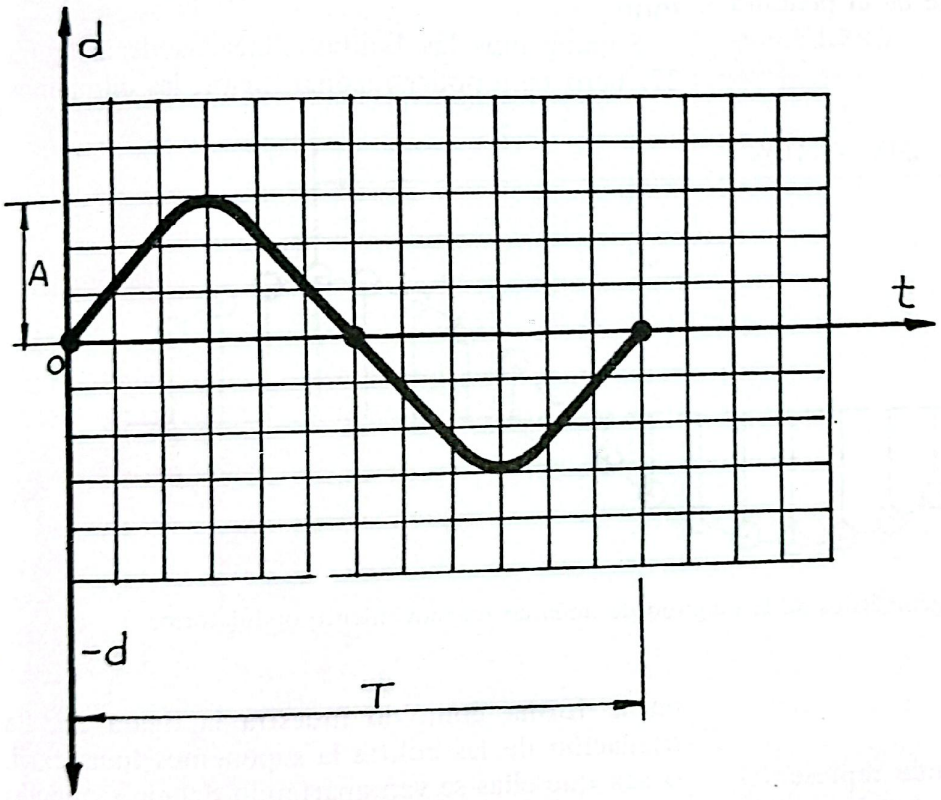


Fig. 35. – La senoide representa a todo movimiento oscilatorio.

En esta explicación hemos supuesto que no hay pérdidas en el movimiento oscilatorio del péndulo, por roce con el aire y roce del hilo en el centro de suspensión. Eso va amortiguando el movimiento, pero estas cuestiones serán estudiadas más adelante. Por ahora consideramos el movimiento ideal, sin amortiguación.

Todo movimiento oscilatorio puede ser representado por una senoide, tal como la de la figura 35. Hay dos características fundamentales de esa curva que la caracterizan: una es la amplitud máxima *A* que se considera desde el centro o eje de reposo hacia arriba o hacia abajo. La amplitud hacia arriba se llama positiva y hacia abajo es la negativa, siendo ambas iguales. En el caso del péndulo, la amplitud positiva es el apartamiento desde la vertical hacia la derecha y la negativa es una distancia igual desde el eje vertical hacia la izquierda, distancia *d* en la figura 33.

La importancia que tienen estos conceptos en la Física y en ciencias derivadas de la misma no necesita ser destacada. Todas las ondas, sean de radio, televisión, de luz, de sonido, etc. son oscilaciones y su desplazamiento se cumple según un gráfico como el de la figura 35; sus frecuencias van desde los pocos ciclos por segundo hasta los miles de millones de ciclos por segundo. Y siempre veremos la senoide como representación gráfica de una onda, de un movimiento oscilatorio o vibratorio.

Volviendo al movimiento pendular, haremos una reflexión interesante. Todavía se ven relojes a péndulo en los comercios de antigüedades y el

lector habrá observado que cuando funcionan, los péndulos cortos se mueven con rapidez y los largos con lentitud. Es que el período de la oscilación de un péndulo depende exclusivamente de la longitud *l*, figura 33, más exactamente de la raíz cuadrada de esa longitud. Esto nos dice que un péndulo cuatro veces más largo que otro tiene un período de doble duración, ya que la raíz cuadrada de 4 es 2.

En el caso de los relojes hay que mantener las oscilaciones compensando la amortiguación de las mismas por roce del aire y en el pivote de suspensión; eso se logra dotando al mecanismo de un sistema a cuerda o eléctrico que da el péndulo un impulso adicional compensatorio de tal amortiguación.

para el movimiento ondulatorio que no aparecía en el pendular. Este último se cumplía en un lugar fijo mientras que el fenómeno ondulatorio se propaga a través del espacio o de la materia. Esa propagación se cumple con una cierta velocidad. La velocidad de propagación depende de la naturaleza del fenómeno, pues así como las ondas sonoras se propagan en el aire a unos 340 metros por segundo, las ondas de radio lo hacen a razón de 300 millones de metros por segundo. Pero hay que extraer una conclusión de mucho interés en la Física, y es el espacio recorrido durante un ciclo completo del movimiento ondulatorio.

Supongamos las bolitas alineadas de la figura 27, pero para poder razonar mejor, las dibujamos

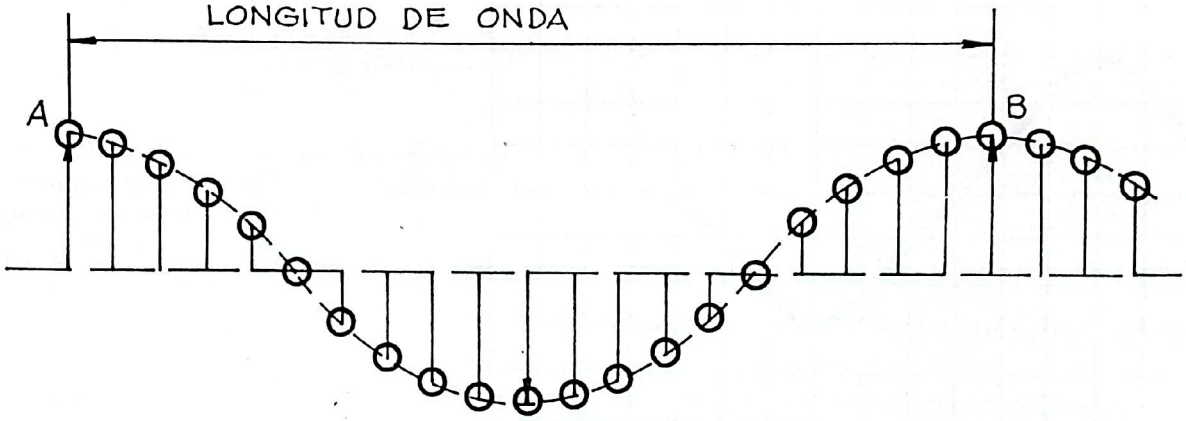


Fig. 36. Interpretación geométrica de la longitud de onda en un movimiento ondulatorio.

Movimiento ondulatorio

Si recordamos la figura 27 donde representábamos un fenómeno que encuadraba dentro de los movimientos oscilatorios, y que se producía por un choque elástico de la primer bolita sobre la segunda, esta sobre la tercera, etc, podemos aplicar a ese caso algunas de las conclusiones a que hemos llegado en los párrafos precedentes.

El movimiento ondulatorio es un caso particular del oscilatorio en el cual la perturbación se propaga a lo largo de un vínculo. Tal vínculo pueden ser cuerpos físicos, moléculas del aire o de otro gas, etc. La propagación del fenómeno se llama *onda* y cada fase o etapa del proceso se puede representar por un gráfico como el de la figura 35 o sea por una senoide. La vibración de cada corpúsculo que integra la cadena se cumple formando ciclos completos, cada uno de los cuales dura un período *T* y la cantidad de períodos en un segundo se llama frecuencia, tal como sabemos.

Pero hay una nueva consideración que hacer en la forma como lo muestra la figura 36. La oscilación de las bolitas la suponemos transversal, o sea que ellas se van apartando del eje siguiendo la ondulación. Mientras se está cumpliendo el fenómeno, todas las bolitas están en movimiento oscilatorio transversal. En un instante determinado la primera bolita llegó a su máximo apartamiento hacia arriba y las otras bolitas de la hilera tienen apartamientos hacia arriba o hacia abajo; inclusive en ese instante algunas están sobre el eje. Si recorremos la hilera llegaremos hasta una bolita que en ese mismo instante está también en la posición máxima hacia arriba; es la bolita *B* que está en igual situación que la *A*. Un instante más tarde habrá cambiado la posición de todas las bolitas, pero siempre la *A* y la *B* estarán en idéntica situación.

Entre esas dos bolitas hay una distancia física a la cual se da el nombre de *longitud de onda*. Si en ves de tomar esas dos bolitas hubiéramos tomado otras dos que cumplieran con la condición de estar siempre en idéntica posición con respecto al eje, la distancia entre ellas sería la misma

longitud de onda. Esta longitud depende, lógicamente, de la velocidad de propagación del fenómeno ondulatorio. Si a la longitud de onda le asignamos la letra griega λ, y aplicamos a este caso las leyes del movimiento uniforme de los cuerpos, podemos calcularla tratándola como una distancia recorrida (figura 28) por un móvil que tiene una velocidad v durante un tiempo T que es el período del proceso:

$$\lambda = v\,T$$

en cuya fórmula podemos reemplazar el período T por su inversa, tal como lo vimos antes, y poner la frecuencia f como divisor:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Lo que nos dice que la longitud de onda de un movimiento vibratorio se calcula dividiendo la velocidad de propagación por la frecuencia de la oscilación. Por ejemplo, una onda de radio que se propaga a una velocidad de 300 millones de metros por segundo y tiene una frecuencia de 1500 millones de ciclos por segundo, tendrá una longitud de onda de:

$$\lambda = \frac{300.000.000}{1.500.000} = 200 \text{ metros}$$

No hace falta destacar la importancia de este tema para el estudio de las técnicas correspondientes a la Electrónica y sus derivados.

Día 5

Después de haber realizado el estudio de las fuerzas y el de los movimientos, podemos pasar a combinar ambas cosas, es decir los efectos de las fuerzas cuya evaluación compete a la Dinámica. Si lanzamos un proyectil al espacio sobre el mismo actuarán la fuerza expansiva de la pólvora y la atracción de la tierra, de tal modo que la trayectoria seguida será una composición geométrica; este solo ejemplo nos demuestra que, conociendo las fuerzas y los movimientos, tenemos que aprender a analizar la combinación de ambas cosas para saber qué pasa con el cuerpo sometido a ellas.

Queda justificada así la necesidad de dedicar una jornada al estudio de los efectos de las fuerzas sobre los cuerpos en todas sus variantes. Planteado el tema del día, aprestémosnos a abordarlo.

EFECTO DE LAS FUERZAS – DINAMICA

Dijimos que la Física estudia el estado de reposo o de movimiento de los cuerpos y ahora agregamos que para modificar uno u otro de esos dos estados se necesita la acción de una fuerza. La parte de la Física que estudia los efectos de las fuerzas se llama *Dinámica* y en cierto modo en el estudio de la misma se presentan nuevamente los temas dados en los dos capítulos anteriores. En efecto, las fuerzas producen movimiento y éste se cumple según ciertas condiciones que conocemos.

La inercia

Uno de los principios fundamentales de la Dinámica dice que un cuerpo no puede modificar por sí mismo el estado de reposo o de movimiento que posee. Para cambiar un estado por el otro es menester la intervención de un agente exterior. Así, si una piedra está apoyada en el suelo, en reposo, para que comience a moverse hay que empujarla; la acción de empuje es el agente que ha cambiado el reposo por el movimiento. Claro está que si intervienen dos o más agentes, en condiciones tales que sus efectos se anulen, la piedra no se moverá; es el caso de que se la empuje desde dos lados, pero de manera que los sentidos de la acción sean contrarios. Pero tal condición puede interpretarse como que no existe el agente, puesto que se compensan y no producen ningún efecto sobre el cuerpo. Si un cuerpo no está en reposo, debe estar en movimiento y si no mediara ningún agente que lo frene, ese movimiento continuaría indefinidamente. Veremos posteriormente que tal cosa no es posible, porque existe un agente que conspira contra todos los movimientos, frenándolos: es el rozamiento.

Caída de los cuerpos

El estudio del movimiento acelerado tiene una aplicación inmediata de mucha importancia. Se trata de la caída de los cuerpos. La Tierra ejerce una atracción sobre todos los cuerpos, que tiende a acercarlos a su centro, llamada *gravitación universal.* Un cuerpo librado en el espacio es atraído por la Tierra y adquiere un movimiento rectilíneo en la dirección que va hacia el centro de la Tierra, dirección que llamamos *vertical.* Claro está que el movimiento cesa cuando el cuerpo llega a la superficie terrestre, pero antes de eso se cumple el movimiento rectilíneo acelerado, ya que el cuerpo parte del reposo y va cobrando velocidad en aumento.

La aceleración que la Tierra impone a los cuerpos atraídos por ella es variable con el lugar geográfico, pero para nuestra ubicación es de unos *9,81 m/s,* lo que quiere decir que si se toma una piedra y se la suelta desde un lugar elevado, en el aire, al cabo de un segundo esa piedra tendrá una velocidad de 9,81 m/s; al cabo de dos segundos su velocidad será 19,62 m/s, y así suce-

sivamente. En resumen, cada segundo, la velocidad de la piedra va aumentando en esa cantidad o aceleración, 9,81 m/s.

Para esta clase de movimiento vale la ecuación general de los movimientos acelerados, con la modificación hecha para velocidad inicial nula, es decir que después de soltado el cuerpo, la velocidad en un instante cualquiera será:

$$v = a\,t$$

si llamamos a a la aceleración definida (9,81 m/s) y t al número de segundos transcurridos desde que se inició el movimiento. Quiere decir que al cabo de 20 segundos, por ejemplo, el cuerpo tendrá una velocidad de:

$$v = 9{,}81 \times 20 = 196{,}20 \text{ m/s}$$

Que da idea de porqué los cuerpos tardan tan poco en llegar a la Tierra si caen desde lo alto. Hay que aclarar que esas condiciones rigen si no se toma en cuenta la resistencia que opone el aire al movimiento, es decir que ese movimiento se cumplirá en el vacío, donde no hay nada que impida el movimiento; es sabido que se puede retardar la velocidad de caída de un cuerpo con un paracaídas, por ejemplo, cuya misión es ofrecer una gran superficie para que el aire ofrezca una enorme resistencia al movimiento. Un cuerpo de reducido tamaño y gran peso, por ejemplo, cae prácticamente con la velocidad dada por la fórmula anterior, pues la resistencia que le opone el aire es reducida.

Una interesante derivación de la fórmula anterior es calcular el tiempo que tardará un cuerpo en llegar a la Tierra si cae desde una altura dada, suponiendo que el aire no tiene influencia, pues sino el cálculo sería muy complicado (figura 37).

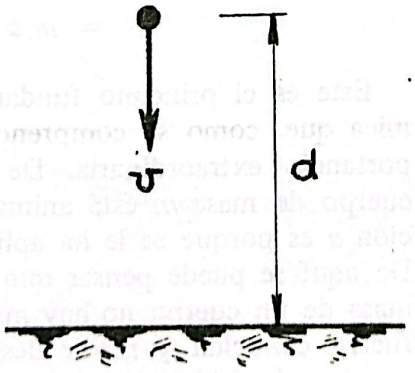


Fig. 37. Un cuerpo atraído por la tierra cae con velocidad v.

Sea por ejemplo un cuerpo que se suelta a unos 1500 metros de altura sobre la superficie de la Tierra; se desea saber cuánto tardará en llegar a ésta. Aplicando la fórmula conocida, que da el espacio en función de la velocidad:

$$d = v\,t$$

pero la velocidad sabemos que vale:

$$v = a\,t$$

o, más propiamente, puesto que a la aceleración de la gravedad terrestre se le asigna la letra g, en lugar de la a:

$$v = g\,t$$

Resulta que el espacio o distancia recorrida por el cuerpo será:

$$d = g\,t^2$$

en cuya expresión conocemos la distancia (1500 m) y la aceleración g (9,81 m/s), luego podemos despejar t mediante auxilio del Algebra:

$$t^2 = \frac{g}{d}$$

y sacando raíz cuadrada de ambos miembros nos queda t en uno y en el otro lo que se ve a continuación:

$$t = \sqrt{\frac{d}{g}} = \sqrt{\frac{1500}{9{,}81}} = 12 \text{ segundos}$$

resultado aproximado, pues se han despreciado los decimales. Quiere decir que el cuerpo, no interviniendo la resistencia del aire, tardará unos 12 segundos en caer.

Concepto de masa

Dijimos, al principio del capítulo, que para modificar el estado de reposo de un cuerpo era menester la actuación de un agente. Había que empujar a la piedra para que se moviera. Ese agente, esa acción que empuja o realiza cualquier otra misión con el mismo objeto, se llama *fuerza*. Diremos entonces que fuerza es todo aquello capaz de modificar el estado de reposo o de movimiento que tiene un cuerpo. De reposo, cuando lo empuja o tira para moverlo; de movimiento, cuando lo frena.

La locomotora ejerce una fuerza de tracción para arrastrar al tren; el motor de un automóvil ejerce una acción o fuerza que impulsa a girar a las ruedas para mover al vehículo. Hay infinidad de ejemplos para probar que, siempre que un cuerpo que está en reposo se pone en movimiento, es porque ha actuado una fuerza. Lo mismo para hacer cesar un movimiento es necesario una

fuerza que lo frene. Cuando sostenemos un paquete, estamos ejerciendo una fuerza que impide el movimiento, pues la atracción de la Tierra tiende a llevar el paquete hacia su centro, o por lo menos hasta la superficie del suelo. La fuerza que ejercemos impide ese movimiento, que si bien no se realizaba cuando tomamos el paquete de sobre la mesa, por ejemplo, comenzaría de inmediato si sacamos la mesa que lo sostiene.

Las fuerzas tienen los más variados orígenes, según cual sea el agente físico que las produce. La Tierra, con su atracción gravitacional, es uno de ellos. La electricidad, el magnetismo, el calor, la luz, etc., son todos agentes físicos capaces de originar fuerzas. Cómo y cuándo las originan, son asuntos que pertenecen al estudio particular de cada uno de ellos. Por ahora nos ocuparemos de los efectos de las fuerzas sobre los cuerpos, en lo que atañe al efecto sobre su movimiento o su reposo, si es que cambian un estado por otro, o sólo lo modifican levemente.

Hemos dicho que una manifestación de la fuerza era la atracción de la Tierra; que esa atracción se manifestaba atrayendo los cuerpos hacia su centro, siguiendo la dirección que llamamos vertical. Ahora bien, un cuerpo colocado en cualquier lugar del espacio está sometido a una fuerza que lo atrae hacia la superficie de la Tierra. Pero también sabemos que debido a esa fuerza el cuerpo se moverá rápidamente en la dirección señalada es decir, caerá con un movimiento acelerado, o, lo que es lo mismo, tendrá una cierta aceleración.

Dejando de lado por un momento las consideraciones anteriores, pasemos a observar un mecanismo conocido, como es la balanza (figura 38).

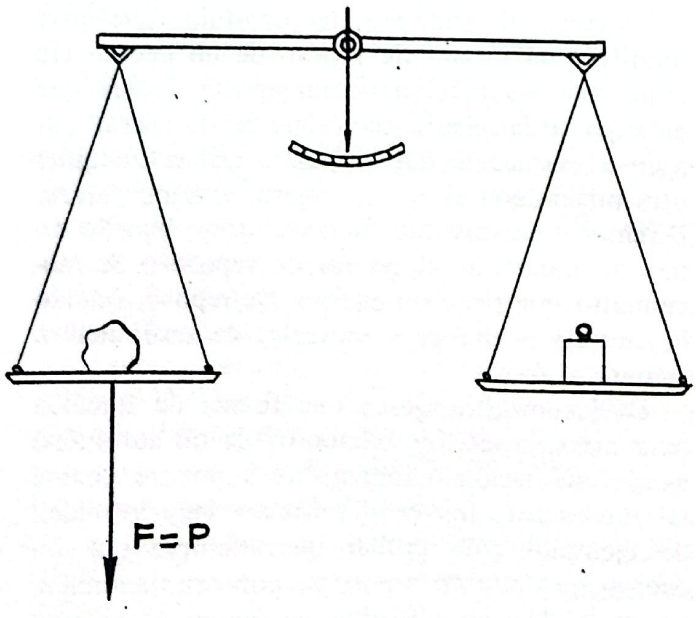


Fig. 38. – La balanza es un caso de equilibrio de fuerzas.

Un cuerpo colocado en un platillo y una pesa en el otro provocan el equilibrio, indicado por la aguja superior de la balanza, cuando son iguales. ¿Qué es lo que hace que baje el platillo de la balanza cuando le colocamos un peso encima? La fuerza de la gravedad, la atracción de la Tierra. En ese entonces le llamábamos fuerza, pero si estamos hablando de una balanza, a esa fuerza la llamamos *peso.*

Llegamos a la conclusión que el peso de un cuerpo no es otra cosa que la fuerza con que es atraído por la Tierra. El peso es la medida de la atracción de la gravedad. Igual que las fuerzas, el peso se mide en Kilogramos, lógicamente, ya que *es una fuerza.*

Si no existiera la gravedad, los cuerpos no tendrían peso y al tomarlos con la mano no se notaría más que su tamaño. Sin embargo están formados por materia densa en mayor o menor grado. ¿Cómo se podría expresar una cantidad de materia que forma un cuerpo, en ese caso de no existir el peso? Surge aquí el concepto de masa, o de cantidad de materia. Si se toma una cierta porción de materia como unidad de masa, otra porción tendrá más masa o menos que la primera, es decir, podemos medirla, determinar cuánto más grande es una que otra y llegar a decir que el cuerpo tiene una masa de 20 unidades, o de 50 unidades, etc. Se llega así a medir la masa de un cuerpo.

Principio fundamental de la Dinámica

Un cuerpo sometido a una fuerza, si está libre de moverse, adquiere un movimiento acelerado, cumpliéndose la siguiente relación entre la masa m del cuerpo, la fuerza F que se le aplicó y la aceleración a que adquiere:

$$F = m\,a$$

Este es el principio fundamental de la Dinámica que, como se comprenderá, tiene una importancia extraordinaria. De modo que si un cuerpo de masa m está animado de una aceleración a es porque se le ha aplicado una fuerza F. De aquí se puede pensar que para determinar la masa de un cuerpo no hay más que aplicarle una fuerza conocida y medir después la aceleración que ha adquirido, o sea el aumento en su velocidad que ocurre en un segundo. Es cierto que se podría proceder así, pero piénsese que el peso de un cuerpo es una fuerza y la gravedad actúa con una aceleración conocida, de modo que podemos simplificar nuestro cálculo. En efecto, en la ecua-

ción escrita anteriormente se puede despejar la masa, mediante transposición de términos:

$$m = \frac{F}{a}$$

De modo que dividiendo el peso de un cuerpo por la aceleración de la gravedad, se obtiene la masa de dicho cuerpo. Dijimos en otro lugar que la aceleración de la gravedad dependía del lugar en que se estaba, pero que se podía tomar alrededor de 9,8, es decir, cerca de 10. De manera que la masa de un cuerpo es, en números, algo más de la décima parte de su peso.

Centro de gravedad

El concepto de centro de cualquier cosa se refiere a su parte media, a una parte que equidista de las demás. En el caso de la masa, el centro de masa o centro de gravedad no se puede referir a distancias, sino que se trata de un punto alrededor del cual se supone acomodada la masa del cuerpo. En una esfera, el centro de masa está en el centro de la esfera, si está hecha con un material homogéneo, es decir, de densidad uniforme. En el caso de cuerpos irregulares, no es tan fácil afirmar dónde está el centro de la masa.

Supongamos una placa de forma triangular, *A B C* según figura 39. Si la suspendemos por un hilo de uno de sus vértices, el *A* por ejemplo, la placa adoptará la posición *a* de la figura. La masa que queda a ambos lados de la recta punteada, que es prolongación de la dirección del hilo, es la misma. El cuerpo se dispone de manera que a ambos lados quede igual masa, luego el centro de masa debe estar ubicado sobre esa línea punteada. Cambiamos de sitio el hilo, sujetándolo al vértice *B*. La placa tomará la posición *b* de la figura. Si hemos tenido la precaución de marcar la línea punteada que partía de *A*, con un lápiz, ahora podemos trazar la nueva línea punteada que parte de *B*. Donde se cortan las dos líneas punteadas, se tiene el centro de gravedad *G* de la placa.

Un cuerpo suspendido por su centro de gravedad está en equilibrio indiferente, es decir, cambiando su posición queda en la nueva que se le dé. Si suspendemos la placa de la figura 39, por el punto *G*, mediante una perforación por la que hacemos pasar el piolín, esa placa quedará en la posición que la coloquemos, sea la *a*, la *b*, de la figura o cualquier otra.

Los cuerpos de material homogéneo, es decir, de igual densidad en todas sus partes, tienen su centro de masa en el centro geométrico, como es el caso de la figura 39. Los cuerpos de densidad no uniforme tienen su centro de gravedad en otro lugar, que se puede determinar suspendiéndolo en dos o tres posiciones, según se ha indicado.

Condiciones del equilibrio

En el capítulo 3 estudiamos el equilibrio de las fuerzas, diciendo que si la resultante de dos o más fuerzas aplicadas a un punto es nula, el sistema está en equilibrio. Desde el punto de vista

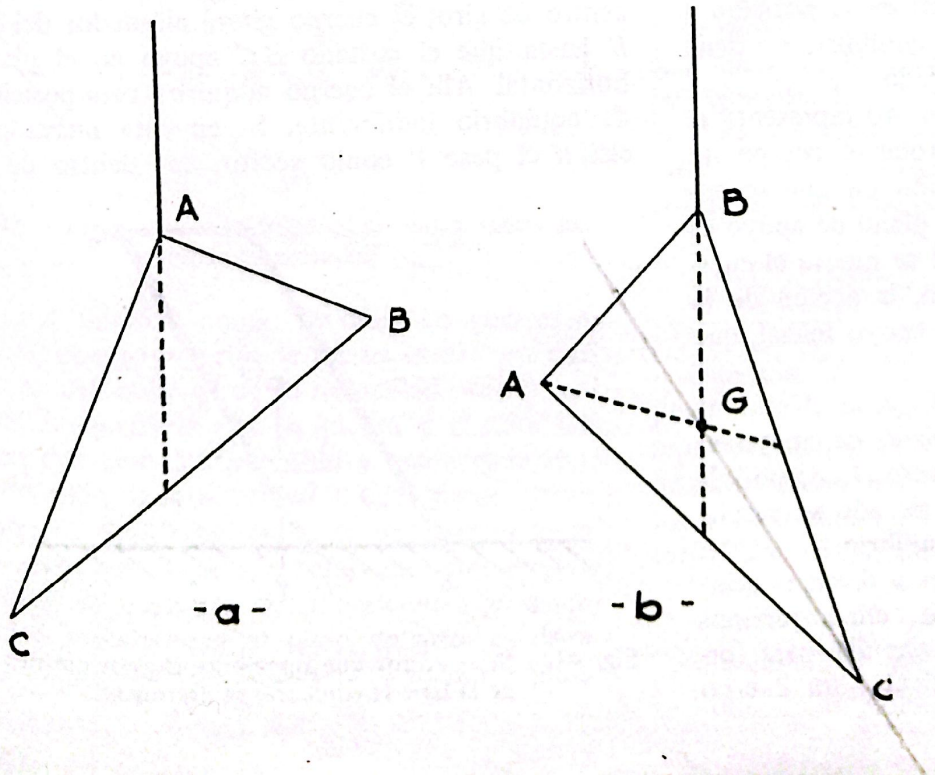


Fig. 39. – Si se suspende un cuerpo, la vertical pasa por su centro de gravedad.

de las fuerzas como entes abstractos, esa definición era suficiente, pero las fuerzas actúan sobre los cuerpos y entonces entramos en el dominio de la Dinámica.

Un cuerpo simplemente apoyado sobre una mesa está sometido a dos fuerzas: el peso propio, que representa la atracción o fuerza que ejerce la tierra sobre esa cuerpo, y la reacción o fuerza contraria que evita que el cuerpo caiga. La reacción está ejercida por la mesa. Como la reacción es una consecuencia de la acción de la gravedad, la misma será de igual valor y sentido contrario al peso del cuerpo. Luego, estamos frente a un sistema de fuerzas formadas por dos iguales y contrarias; el sistema está en equilibrio.

La figura 40 A representa lo que acabamos de decir; el peso del cuerpo es una fuerza vertical, aplicada en el centro de gravedad del cuerpo. Se supone que el plano de apoyo es perfectamente horizontal.

Hay tres condiciones de equilibrio según las posibilidades de que ese estado se pueda o no alterar. El representado en la figura 40 A se

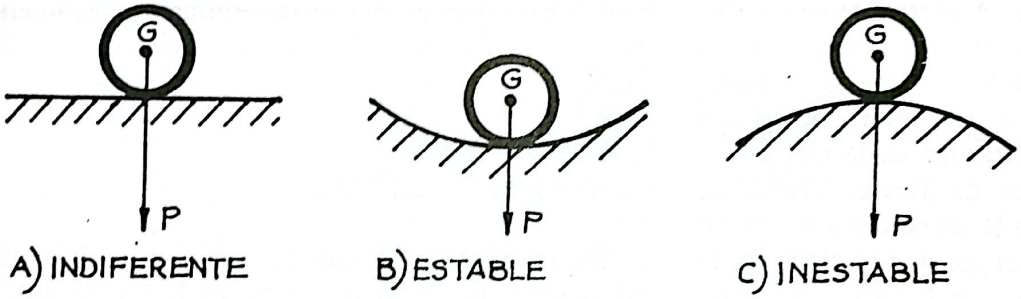


Fig. 40 – Las tres clases de equilibrio en que puede estar un cuerpo.

llama equilibrio *indiferente*, porque si corremos la esfera hacia un lado u otro, el equilibrio se mantendrá y la esfera se queda en la posición a que se la lleve. Este estado de equilibrio no tiene un punto de apoyo fijo u obligado.

La ilustración B de la figura 40 representa el llamado equilibrio *estable* porque el cuerpo no puede ser sacado de la posición en que se encuentra, ya que vuelve a él. El plano de apoyo es aquí una superficie cóncava; si se mueve el cuerpo hacia un lado o hacia otro, la acción de la gravedad lo llevará al punto de apoyo inicial, que es el más bajo.

La tercera posición es la C y se denomina equilibrio *inestable*. Aquí el plano de apoyo es una superficie convexa y en cuanto el cuerpo sale un poco del punto de apoyo elevado se desplazará y caerá, rompiéndose el equilibrio.

Si llevamos estas definiciones a diversos cuerpos y posiciones de equilibrio, encontraremos que la esfera es un caso particular útil para formular tales definiciones. En efecto, un cuerpo sólido que tenga una base plana está siempre en equilibrio indiferente y un cono apoyado por su vértice es un caso de equilibrio inestable, aunque el lector tenga dificultades para comprobar que realmente se queda en posición de equilibrio. Si consideramos fuerzas actuantes que no sean las de la gravedad, un resorte está en equilibrio estable, porque al estirarlo o comprimirlo, vuelve solo a su posición de estabilidad. Un vehículo está en equilibrio indiferente si está apoyado en un plano horizontal.

El equilibrio indiferente puede ser roto en determinadas condiciones. Sea un sólido apoyado en su base, tal como se ve en la figura 41. El centro de gravedad de ese cuerpo es G y el peso es una fuerza aplicada a ese centro de gravedad. Si el vector P cae dentro de la base, el cuerpo estará en equilibrio indiferente, pero si cae fuera de la base, caso de la figura 41, el cuerpo perderá su equilibrio y caerá. Veamos el por qué de ello.

Si recordamos la figura 17, teníamos que una fuerza aplicada a cierta distancia del centro de giro provocaba un movimiento de rotación. En este caso la fuerza P, peso de cuerpo queda afuera de la base $A\,B$, y luego B pasa a ser un centro de giro; el cuerpo girará alrededor del eje B hasta que el costado $B\,C$ apoye en el plano horizontal. Allí el cuerpo adquirirá otra posición de equilibrio indiferente. Si en esta nueva posición el peso P como vector, cae dentro de la

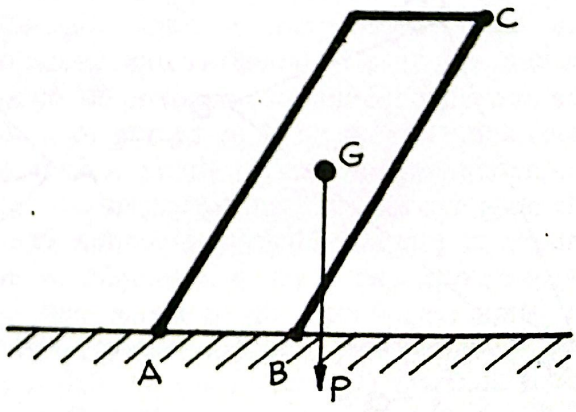


Fig. 41. Si el vector que representa el peso cae fuera de la base el equilibrio se destruye.

base que será ahora $B\,C$, el equilibrio se mantendrá.

En el caso particular que la fuerza P pase justo por el borde de la base B, estamos frente a un caso de equilibrio inestable parcial. Si el cuerpo sufre una ligera desviación hacia la derecha, caerá y si la desviación es hacia la izquierda, entra en estado de equilibrio indiferente.

Fuerza centrífuga

Hemos estudiado el movimiento de los cuerpos en rotación, pero sin contemplar sus efectos dinámicos. Veamos cuáles son estos efectos. Supongamos que se ata una piedra a un hilo y se la hace girar rápidamente. Se nota que se ejerce una tracción sobre el hilo, que tira la piedra hacia afuera. Esa tracción no puede ser otra cosa que una fuerza, que se llama centrífuga. Si aumentamos la velocidad de giro de la piedra notamos que aumenta la fuerza centrífuga, al extremo que rompe al hilo y la piedra es despedida violentamente hacia afuera.

Esas consideraciones vulgarizadas nos dicen varias cosas, que trataremos de explicar (figura 42). Sea un punto O el centro de giro de un

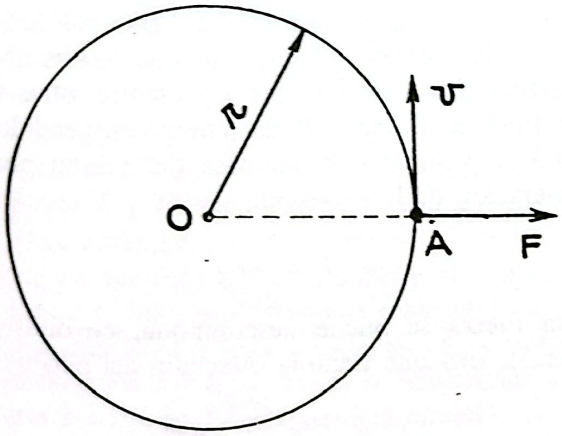


Fig. 42. - La fuerza centrífuga obra sobre todos los cuerpos en rotación.

cuerpo A unido a aquél. El radio de giro es r. Sobre el cuerpo A actúa la fuerza centrífuga que depende del radio y de la velocidad, como podemos comprobarlo con la piedra y el hilo. Un cuerpo que gira está sometido a una aceleración, que depende de la velocidad v, con que se mueve el cuerpo. Según las leyes de la Dinámica, la aceleración que sufre un cuerpo que gira es proporcional al cuadrado de la velocidad e inversamente proporcional al radio de giro, es decir mayor a grandes velocidades pero menor a grandes radios, todo lo cual lo comprueba la simple experiencia. Ahora bien, matemáticamente, eso se puede expresar así:

$$a = \frac{v^2}{r}$$

Donde a es la aceleración de que está animado el cuerpo A, v es su velocidad y r el radio de giro.

Pero conociendo la aceleración y la masa del cuerpo A, es posible calcular la fuerza que actúa sobre él, mediante aplicación del principio fundamental de la Dinámica, pues basta multiplicar esa masa por la aceleración:

$$F = m\,a = \frac{m\,v^2}{r}$$

Que nos dice que la fuerza centrífuga será enorme a grandes velocidades, por aumentar con el cuadrado de la velocidad. Esto lo saben todos los bobinadores de motores eléctricos, porque para motores veloces deben emplear sunchos resistentes, a fin de evitar que el bobinado sea arrancado del rotor al girar éste. Además la fórmula nos dice que a grandes radios la fuerza centrífuga disminuye, cosa fácilmente comprobable en el caso de la piedra y el hilo, pues poniendo un piolín más largo se nota que la tracción que se siente en la mano es menor. Claro que hay que evitar hacer confusiones, pues es cierto que la fuerza disminuye al aumentar el radio, pero siempre que se mantenga la misma velocidad perisférica de la piedra, o sea su velocidad lineal.

Para aclarar cómo se evita esa confusión, supongamos un cuerpo que gira alrededor de su eje, como es el caso de los motores eléctricos, por ejemplo. La velocidad de cualquier punto de la masa del rotor, si da n revoluciones por minuto y ese punto está a un radio r desde el centro del eje, ya sabemos que vale:

$$v = \frac{2\,\pi\,r\,n}{60}$$

Que nos dice que la velocidad lineal de los puntos va aumentando a medida que nos alejamos del centro, si se mantiene el mismo número de giros. Ahora podemos substituir esta expresión de la velocidad en la fórmula que da la fuerza centrífuga, lo que nos da:

$$F = \frac{m\,2^2\,\pi^2\,r^2\,n^2}{r\,60^2}$$

Fórmula que puede ser simplificada con ayuda de la Aritmética, quedando finalmente:

$$F = 0{,}011\ m\ r\ n^2$$

Y que permite analizar la fuerza centrífuga y sus efectos. En efecto, esta expresión nos dice que en los cuerpos que giran alrededor de su eje con n r.p.m., teniendo una masa m y si sus puntos más alejados del eje están a un radio r la fuerza centrífuga será tanto mayor cuanto más grande sea la masa en movimiento, cuanto más alejado del eje esté un punto y cuanto más rápido sea el giro; este último detalle es muy importante, pues como F depende del cuadrado del número de giros, a doble velocidad tendremos una fuerza 4 veces mayor; a triple velocidad una 9 veces mayor, etc. Esta última causa es la que limita la velocidad de las máquinas rotativas a valores compatibles con la resistencia de los materiales, pues la fuerza centrífuga llegaría a provocar rupturas. Todo electricista sabe lo que sucede cuando un motor eléctrico *dispara*, es decir, cobra accidentalmente una velocidad mucho mayor que la normal: la fuerza centrífuga es tan grande que rompe los sunchos del bobinado y éste sale de sus ranuras hacia afuera, con violencia. La expresión vista, aclara las razones por las cuales sucede eso.

Pero de todos los casos en que actúa la fuerza centrífuga tal vez el más conocido es el que ocurre en las curvas en los caminos cuando un vehículo corre a alta velocidad. En efecto, un trozo de curva puede suponerse formando parte de una circunferencia y el cuerpo móvil en un instante dado aparece como girando alrededor de un centro distante. La figura 43 nos muestra, a la izquierda, lo que pasa con un vehículo pasando por esa curva. La fuerza centrífuga tiende a correrlo hacia afuera y el peso propio tiende a empujarlo contra el piso; ambas fuerzas se componen mediante el conocido diagrama vectorial y la resultante es R, que reemplaza al peso P y a la fuerza centrífuga F. Si R pasa por un punto A que queda afuera de la base del vehículo lo volcará, pues estamos frente a la situación planteada en la figura 41.

Por esta razón las curvas de los caminos se hacen con inclinación, de modo que el borde exterior de la curva quede más alto. Eso se llama *peralte* del camino, y es lo que se muestra en la figura 43 a la derecha. Ahora podemos hacer el diagrama vectorial y para iguales valores del peso y la fuerza centrífuga, comprobamos que la resultante pasa por un punto que queda más adentro que A, borde de la base. Es evidente que el peralte se calcula para una cierta velocidad máxima, pues la fuerza centrífuga aumenta con el cuadrado de la velocidad; por ello en las curvas de los caminos se coloca un cartel con la velocidad máxima a que debe circularse en ese lugar.

Oscilación del péndulo

El movimiento pendular fue estudiado en la figura 33, desde el punto de vista cinemático puro, es decir, sin considerar las fuerzas actuantes. Ahora retomaremos el punto para considerar el efecto de tales fuerzas. La figura 44 nos recuerda la anterior citada, solo que hemos hecho aparecer dos vectores que representan otras tantas fuerzas. El peso P del cuerpo suspendido es igual al producto de la masa del mismo por la aceleración de la gravedad:

$$P = m\ g$$

Esta fuerza se puede descomponer en otras dos fuerzas, una que tiene la dirección del hilo y otra

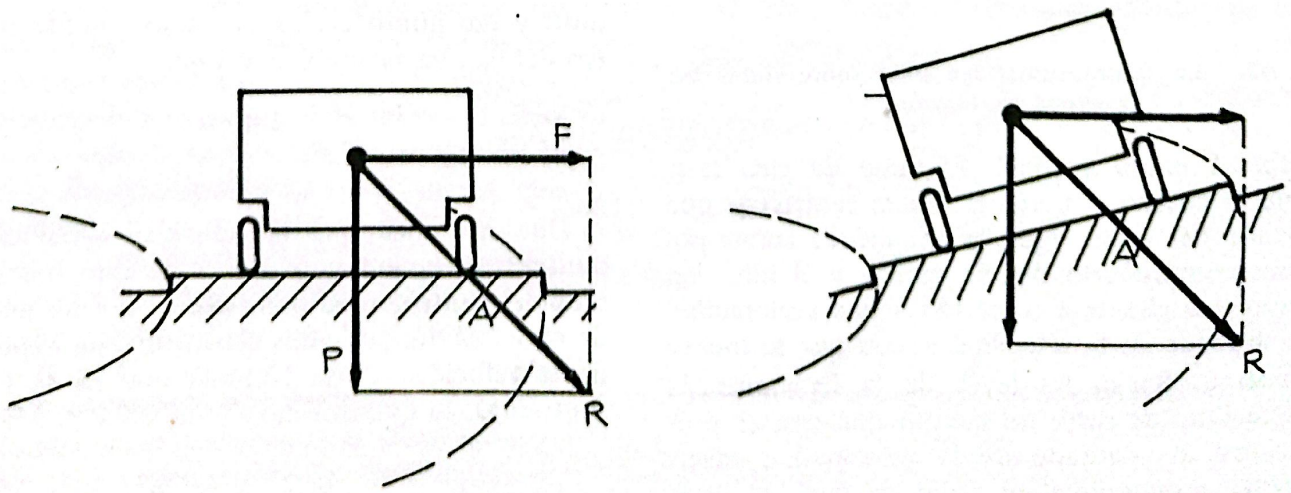


Fig. 43. – En una curva del camino, sobre el vehículo actúa la fuerza centrífuga.

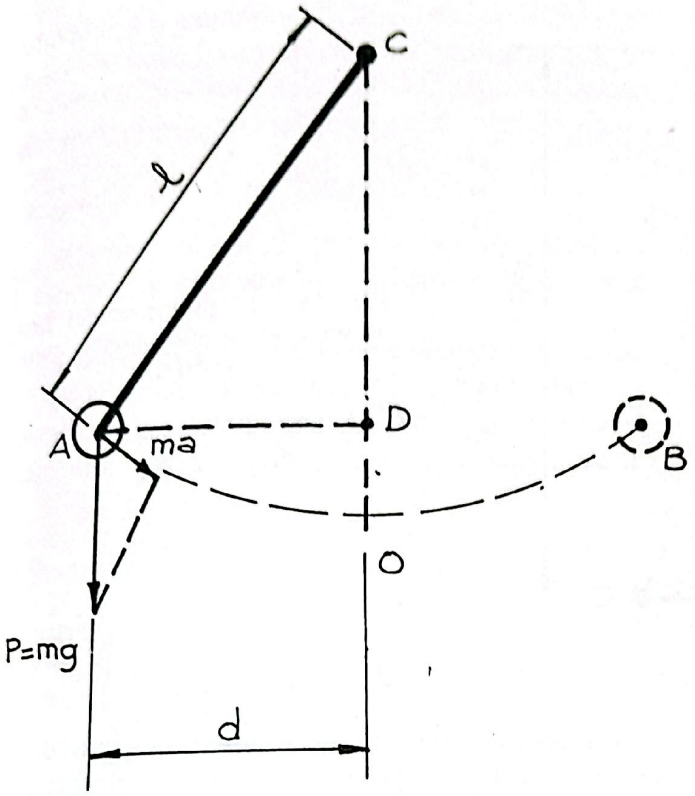


Fig. 44. – En el movimiento pendular el peso da origen a una fuerza impulsora.

que es tangente al arco $A\,O\,B$. La primera representa la tensión que sufrirá el hilo y no nos interesa para estudiar el movimiento que se produce, pero la otra es un vector que da:

$$F = m\,a$$

o sea es el producto de la masa del cuerpo por la aceleración del movimiento producido. Es evidente que P y F están relacionadas entre sí por la configuración geométrica, pues el triángulo que forman los vectores de las fuerzas y el triángulo que forma el hilo, el $C\,A\,D$ son semejantes. Esto nos dice que a y g están entre sí en la misma proporción que d y l, ya que al relacionar los dos vectores la masa m del cuerpo desaparece:

$$\frac{d}{l} = \frac{m\,a}{m\,g} = \frac{a}{g}$$

La eliminación de la masa del cuerpo en la relación anterior nos dice que ella no intervendrá en los cálculos del tiempo de oscilación. En efecto, para calcular ese tiempo o período T de la oscilación, es decir el tiempo que transcurre desde la posición A hasta que el cuerpo vuelve a la misma A, hay que hacer un proceso matemático. El espacio recorrido durante ese tiempo es el doble del arco $A\,O\,B$ y el tiempo tardado en recorrerlo es T; como el arco es una parte de la circunferencia de radio l, longitud del hilo y la aceleración tangencial, según lo visto para el tema de fuerza centrífuga, está dada por el cuadrado de la velocidad tangencial divido por el radio de giro, que en este caso es la longitud del hilo l, es dable imaginar que puede calcularse ese período T partiendo de magnitudes conocidas.

Para no fatigar al lector con el desarrollo matemático, que no tiene interés para la Física, daremos el resultado final del mismo, que es:

$$T = 2\,\pi\,\sqrt{\frac{l}{g}}$$

O sea que el período de duración de la oscilación del péndulo depende de su longitud y no de la masa del cuerpo suspendido. Además, depende de la aceleración de la gravedad, o sea de la altitud del punto en que se halla. Cabe destacar que mediante péndulos prolijamente construidos y observaciones minuciosas sobre la duración de la oscilación, se ha podido determinar con precisión el valor de la aceleración de la gravedad en un punto determinado de la tierra. Conviene aclarar que el período T es el doble del tiempo que tarda el cuerpo suspendido en ir desde A hasta B, pues el tiempo de regreso a A es igual al tardado en el movimiento de ida hasta B.

El problema del tiro

La acción de las fuerzas actuantes sobre un cuerpo y los movimientos resultantes de la aplicación de esas fuerzas tiene algunos casos particulares que son muy ilustrativos y permiten aplicar los principios de la Dinámica en forma cabal. En el caso del péndulo, por ejemplo, la única fuerza actuante era la de la gravedad, si bien ella se convertía en una componente impulsora del péndulo. Hay otros casos donde aparecen otras fuerzas que se combinan con la gravedad, dando por resultado movimientos compuestos. Uno de los ejemplos más clásicos en la Física es el del disparo de un proyectil.

La figura 45 nos ilustra sobre el caso. Un proyectil A sale con una velocidad inicial elevada por acción de la fuerza impulsora de la pólvora. Esta acción inicial provoca en la bala un movimiento uniforme que tiene una velocidad v_H, símbolo que hemos elegido para que quede establecido que es una velocidad en dirección horizontal; de no haber roce con el aire esa velocidad se mantendría indefinidamente en su valor hasta que la bala choque con el blanco.

Pero sobre la masa del proyectil actúa otra fuerza, que es la de la gravedad y que está repre-

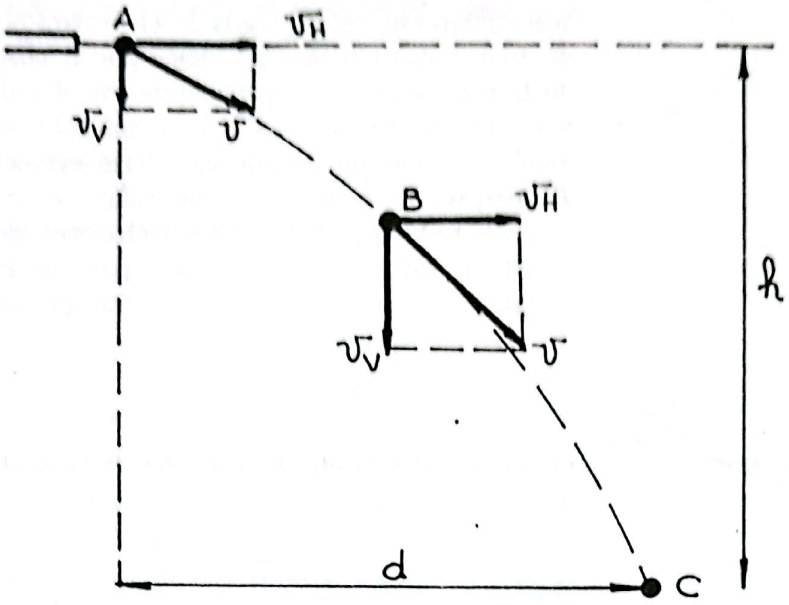


Fig. 45. El problema del tiro es un caso de movimiento compuesto.

sentada por el peso propio del mismo. Esta fuerza actúa en forma permanente y entonces da origen a un movimiento descendente acelerado; a la velocidad de tal movimiento la llamaremos v_V para que quede fijado que es un movimiento vertical.

Para encontrar la trayectoria de la bala hay que componer los dos movimientos y para ello nada mejor que representar a ambas velocidades por vectores, pues sabemos actuar con ellos. Representemos las dos velocidades actuantes mediante vectores que den su dirección, su sentido y, en escala, su magnitud para ambas; en la figura 45 se ve el diagrama de vectores aplicado al punto A, inicial del movimiento. Téngase en cuenta que mientras v_H es constante v_V es creciente, pues su valor es:

$$v_V = g\,t$$

velocidad del movimiento acelerado de caída de los cuerpos. Luego, para otro instante distinto que el del punto A, el diagrama vectorial tendrá su vector vertical más grande. En la figura lo hicimos para el punto B y vemos que la velocidad resultante v tiene mayor inclinación que para el caso del punto A.

El resultado de ir trazando los puntos por los que pasará el proyectil es una curva que se conoce en geometría con el nombre de *parábola* y que en la figura 45 aparece con línea de trazos. Puede calcularse la posición de la bala en cada instante deseado, simplemente considerando separadamente los dos movimientos. Veamos lo que resulta.

En sentido horizontal, el cuerpo parte con una velocidad uniforme v_H y al cabo de un tiempo t habrá recorrido una distancia d dada por:

$$d = v_H\,t$$

En sentido vertical la acción de la gravedad aporta una fuerza permanente que transforma al movimiento en acelerado. La velocidad inicial es cero y la que tiene después de un tiempo t vale $g\,t$, luego, la velocidad media será:

$$\frac{0 + g\,t}{2} = \frac{g\,t}{2}$$

Y el espacio recorrido que llamamos h en la figura 45 será el producto de la velocidad media por el tiempo, o sea:

$$d = \frac{g\,t^2}{2}$$

Para suponer posible el caso planteado en la figura 45 tenemos que disparar el proyectil al borde de un precipio, que no es el caso común. En la práctica, el tiro se hace en forma horizontal en cuanto a los puntos de disparo y de impacto, luego la dirección de salida no puede ser horizontal, pues pasaría lo planteado en la figura 45. Se hace el disparo con cierta inclinación, que en la figura 46 forma un ángulo α con la horizontal. La trayectoria del tiro es también una parábola y la bala alcanza un punto de máxima altura para comenzar a caer mientras avanza, hasta que llega nuevamente a la horizontal en el punto C. La altura máxima está marcada por el punto B.

La fuerza expansiva de la pólvora da origen a una velocidad de salida que representamos con un vector v en la figura 46, pero que podemos descomponer en un vector horizontal v_H y uno vertical v_V, tal como vemos en el diagrama a la

izquierda. La componente horizontal es la que llevará la bala hasta el punto de impacto C, a distancia d, y como se trata de un movimiento uniforme, el camino recorrido vale:

$$d = v_H\, t$$

que dejamos así porque por ahora no conocemos el tiempo transcurrido hasta alcanzar el extremo C.

La componente vertical de la velocidad, vector v_V, es también un movimiento uniforme, pero al mismo tiempo actúa sobre la bala un movimiento acelerado, que es el dado por la atracción de la tierra; el peso de la bala da origen a una velocidad creciente, de valor $g\,t$. Luego, en dirección vertical tendremos dos velocidades: una ascendente v_V y otra descente $g\,t$, pero una es constante y otra creciente. La figura 47 nos muestra esos dos vectores para tres instantes diferentes. El instante a puede ser el inicial, y como v_V es mayor la bala sube; el instante b es cuando ambos vectores son iguales y el cuerpo ni sube ni baja, o sea que se llegó al punto B de la figura 46; el instante c es cuando la gravedad da una velocidad $g\,t$ mayor que v_V y el proyectil desciende.

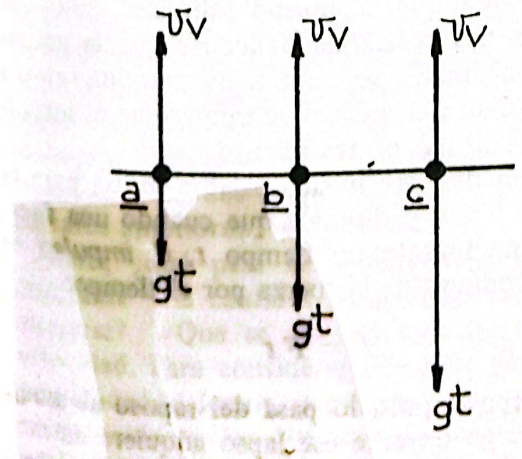


Fig. 47. - En sentido vertical actúan dos velocidades, la componente vertical de la velocidad de salida y la resultante de la gravedad.

La explicación anterior nos da la condición para determinar el tiempo transcurrido para alcanzar el punto B, pues para él los dos vectores son iguales. Si al tiempo total de disparo lo llamamos T, transcurrido el cual la bala llega a C, es lógico que para llegar a B tarda $T/2$. Para ese tiempo igualamos los vectores verticales (figura 47) y se tiene:

$$v_V = \frac{g\,T}{2}$$

de cuya expresión podemos deducir el tiempo total de disparo:

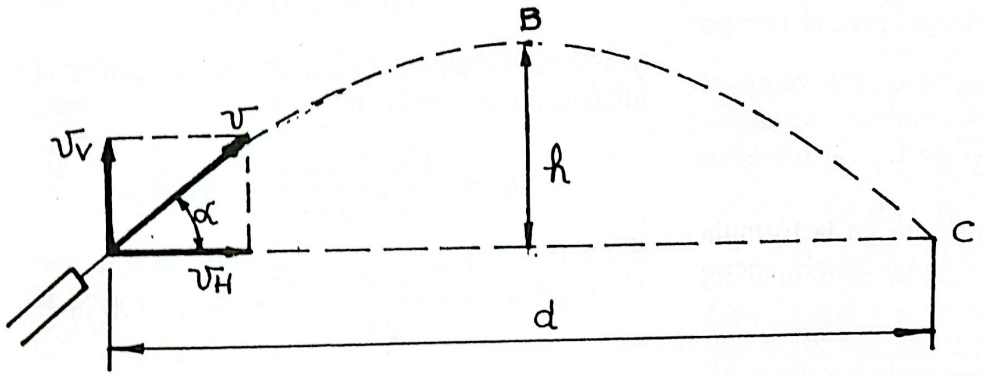


Fig. 46. - La velocidad del proyectil admite dos componentes.

$$T = \frac{2\,v_V}{g}$$

Para determinar el alcance del tiro reemplazamos este valor del tiempo en la fórmula que nos daba la distancia d y se tiene:

$$d = \frac{2\,v_H\,v_V}{g}$$

Y para hallar el valor de la altura alcanzada h (figura 46) tenemos que hacer una consideración que muestra la figura 48. Se trata de suponer que el proyectil hubiera quedado libre de la gravedad, con lo que alcanzaría el punto D y luego la gravedad lo hizo caer hasta B. El camino de ascenso está dado por el producto de v_V por el tiempo, que hemos llamado $T/2$ para ese punto B y el camino de descenso es, de acuerdo con la caida de los cuerpos,

$$\frac{g\,t^2}{2} = \frac{g\,T^2}{4}$$

puesto que el tiempo a considerar es la mitad del total de impacto. El camino que nos interesa es h altura máxima y ella es la diferencia entre los dos caminos antes calculados, de modo que se tiene:

$$h = \frac{v_V\,T}{2} - \frac{g\,T^2}{8}$$

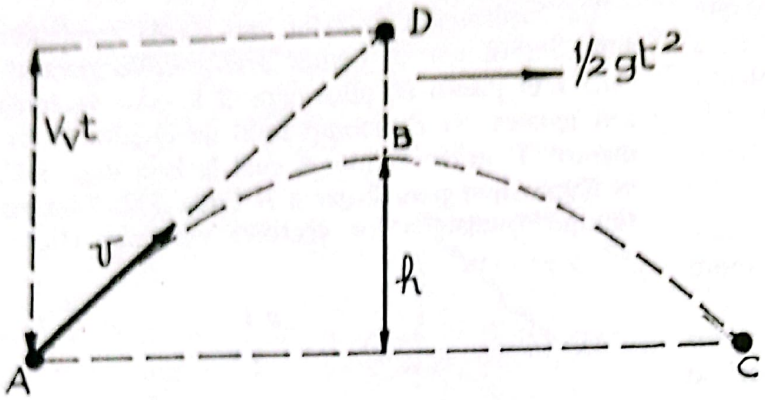


Fig. 48. – Para encontrar la altura máxima del proyectil se hace una composición de movimientos.

Pero para el punto B ocurre que las velocidades verticales son iguales, tal como lo expresa la situación b de la figura 47, luego, para el tiempo $T/2$ se cumple que:

$$v_V = \frac{g\,T}{2}$$

Y si reemplazamos este valor de v_V en la fórmula que da h nos queda, después de un simple operación algebraica:

$$h = \frac{g\,T^2}{8}$$

Que todavía puede mejorarse para que no aparezca el tiempo T que es una de las incógnitas; para ello ponemos en la fórmula anterior el valor encontrado antes para ese tiempo T y nos queda:

$$h = \frac{v_V^2}{2\,g}$$

Vale la pena destacar que en las fórmulas finales para hallar el alcance del tiro, la altura máxima y el tiempo total de disparo, aparecen valores de las componentes de la velocidad v con que la bala sale del caño. Esas dos componentes se pueden determinar mediante el diagrama vectorial de la figura 46, conociendo el ángulo que forma el caño con la horizontal, pero también se pueden determinar analíticamente, por medio de la Trigonometría. Para nuestro objetivo no interesa el camino elegido, pero el diagrama vectorial ya es conocido por los lectores, de modo que lo damos por elegido.

Ejemplo: Supongamos que un cañón tiene inclinación de 30° y dispara una bala con velocidad de 500 m/s. Se desea conocer la altura máxima, la distancia de impacto sobre la horizontal y el tiempo a que se producirá esto último.

Si hacemos el diagrama vectorial de la figura 46 con $v = 500$ m/s y $\alpha = 30°$, obtendremos gráficamente:

$$v_H = 430 \text{ m/s}$$

$$v_V = 250 \text{ m/s}$$

y con esos datos aplicamos las fórmulas vistas anteriormente; se tiene:

$$h = \frac{250 \times 250}{2 \times 9{,}81} = 3180 \text{ m}$$

$$d = \frac{2 \times 250 \times 430}{9{,}81} = 21900 \text{ m}$$

$$T = \frac{2 \times 250}{9{,}81} = 50 \text{ seg}$$

Con la salvedad que en estos resultados no se ha tenido en cuenta el roce con el aire que reduce las cifras reales.

Impulso. Cantidad de movimiento

Una fuerza actúa sobre un cuerpo para cambiar su estado de reposo por el de movimiento, pero su actuación es breve, no continúa aplicada al cuerpo. Es el caso del tiro, por ejemplo, en el cual la expansión de la pólvora lanza al proyectil pero una vez que el mismo salió del caño esa fuerza no está más. Puede decirse que la actuación de la fuerza se realiza durante un cierto tiempo durante el cual el cuerpo recibe el impulso que lo lanza a su movimiento.

Precisamente, esa misma palabra se usa para la definición física y diremos que cuando una fuerza F actúa durante un tiempo t, el *impulso* es igual al producto de la fuerza por el tiempo:

$$I = F\,t$$

El cuerpo impulsado pasa del reposo al movimiento, luego durante ese lapso adquiere un movimiento acelerado, cuya aceleración a se determina, según el principio fundamental de la Dinámica por la relación:

$$a = \frac{F}{m}$$

Y su velocidad al final del período impulsor estará dada por la conocida expresión del movimiento variado:

$$v = a\,t$$

Ahora podemos despejar el valor de la aceleración en esta última fórmula e igualarlo con el anterior, y nos resulta que:

$$\frac{v}{t} = \frac{F}{m}$$

Y haciendo una simple operación matemática de pasar los denominadores a los otros miembros, da la importante igualdad:

$$F\,t = m\,v$$

O sea que el impulso es igual producto de la masa del cuerpo por la velocidad que éste adquiere, lo que se llama *cantidad de movimiento*. El impulso es inicial, pone al cuerpo en movimiento y luego desaparece como agente físico, siendo reemplazado por la cantidad de movimiento que adquirió el móvil. La misma no puede alterarse y si la msas es una constante, el movimiento será uniforme. Esto es lo que ocurría en el tiro; el impulso recibido por la bala le hacía adquirir un movimiento uniforme y aparte de ése la gravedad le imponía un movimiento acelerado. La composición de esos dos movimientos fue estudiada en párrafos anteriores.

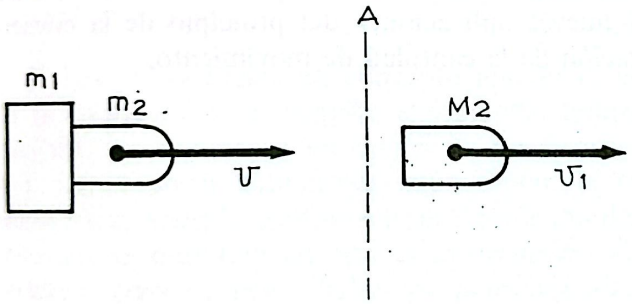


Fig. 49. – Un desprendimiento de masa se traduce en un aumento de velocidad.

Pero, ¿qué pasa si la masa deja de ser una constante y la cantidad de movimiento no puede alterarse? –Que se alterará espontáneamente la velocidad. Para considerar este caso y sacar de su perplejidad al lector, pondremos un ejemplo que es conocido en los últimos tiempos. Supongamos un cuerpo en viaje interplanetario con velocidad v y formado por dos secciones adosadas con masas que en la figura 49 se especifican. Ese viaje continúa indefinidamente con velocidad uniforme, ya que el impulso recibido en la Tierra le comunicó una cantidad de movimiento que resulta el producto de la masa total por la velocidad. Como en el cosmos no hay aire, podemos despreciar los problemas de roce que harían perder velocidad.

En un instante determinado, marcado en la figura con A, se desprende un trozo del cuerpo, que queda con sólo una parte de su masa. La cantidad de movimiento antes y después de ese evento debe ser la misma, de modo que tenemos:

$$\text{antes: } (m_1 + m_2)\,v$$

$$\text{después: } m_2\,v_1$$

Y como el principio de la conservación de la cantidad de movimiento se cumple en la Física, debemos igualar esas dos expresiones:

$$(m_1 + m_2)\,v = m_2\,v_1$$

De donde se deduce que siendo menor la masa después del desprendimiento, la velocidad tiene que experimentar un aumento, o sea que v_1 es mayor que v. Nótese que en cierto modo el desprendimiento actúa como una expansión que incrementa la velocidad. Este fenómeno ha sido muy comentado en los últimos tiempos con motivo de los lanzamientos de cohetes hacia la Luna y otros destinos.

Choque elástico

El principio de la igualdad del impulso con la cantidad de movimiento tiene una interesante aplicación en el caso del choque entre cuerpos elásticos, o sea que no adquieren deformación permanente. Pensemos un instante en una mesa de billar y sobre ella dos bolas iguales de marfil, una que corre hacia la otra que está detenida (figura 50). La bola A recibió un impulso que le dió el jugador con el taco y adquirió una cantidad de movimiento, que es igual al producto de su masa m por la velocidad que lleva v. Al producirse el choque con la bola B, la A se detiene y su cantidad de movimiento se transfiere a la B que se pone en movimiento con velocidad v;

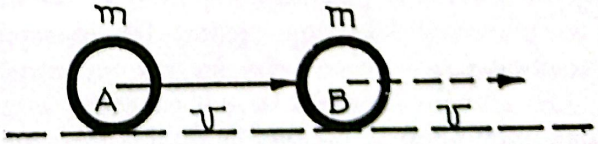


Fig. 50. – Choque entre dos masas iguales: se transfiere la velocidad.

tiene que ser la misma velocidad, puesto que las dos bolas tienen la misma masa y antes y después del choque el producto $m\,v$ debe ser el mismo, por la conservación de la cantidad de movimiento.

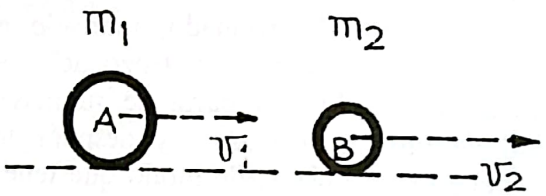


Fig. 51. Choque entre masas desiguales: cambia la velocidad.

Supongamos ahora (figura 51) que la bola B es más pequeña que la A y se produce el choque; la cantidad de movimiento debe ser la misma, de modo que se tiene:

$$m_1 v_1 = m_2 V_2$$

y si la masa de la bola B es menor, la velocidad de la misma debe ser mayor que la que traía la bola A; luego, después del choque la bola A queda detenida y la bola B corre con velocidad mayor que la que traía la otra bola.

Y todavía tenemos un tercer caso a considerar; muchas veces la bola chocante no queda detenida después del choque, sino que sigue corriendo porque solo transfirió a la segunda bola parte de su cantidad de movimiento. Refiriéndonos a la figura 50, supongamos que la bola A traía una velocidad v y después del choque queda con velocidad v_1; la bola B sale con velocidad v_2. El principio de la conservación de la cantidad de movimiento nos impone la ecuación:

$$m\,v = m\,v_1 + m\,v_2$$

$$= m\,(v_1 + v_2)$$

O sea que después del choque las bolas tienen diferentes velocidades, pero la suma de las mismas es igual a la velocidad que traía la bola A antes del choque; esto es válido para bolas de igual masa. El problema podría ser extendido a casos de bolas diferentes y a los casos de lo que se llama choque oblícuo, pero estaríamos frente a nuevas aplicaciones del principio de la conservación de la cantidad de movimiento.

Día 6

Si hay un problema que alcanza siempre relieves universales es el de la energía; el progreso de las comunidades depende de la disponibilidad de energía. Qué es la energía y cómo se manifiesta, son los temas que tenemos que explicar en esta oportunidad. Además, la naturaleza nos brinda energía en muchas formas y el hombre aprendió a modificarla, a cambiarle su forma, para poder utilizarla. Esos cambios deben ser estudiados, además de la evaluación en sí de la energía. Para hacer una mención que nos introduzca en el tema diremos que podemos comprar un poco de energía y llevarlo a nuestra casa en un paquete para usarla en nuestro provecho; no otra cosa hacemos cuando adquirimos un litro de querosen, que es energía en forma química, para encender una estufa que nos da energía térmica en forma de calor. Después de estas consideraciones iniciales, podemos abordar el tema de la presente jornada.

TRABAJO Y ENERGIA

Si hay en la Física un concepto amplio es el de la energía. No se concibe explotación industrial sin que intervenga en alguna de sus formas, y hasta se crean actividades cuyo único fin es transformar energía. Definiendo el significado del término, se dice que *energía es la capacidad de producir trabajo*, pero dicho así parecería algo muy simple. El obrero antes de comenzar su labor está provisto de una buena dosis de energía. Veremos que, técnicamente hablando, no basta constatar que se puede producir trabajo, sino que hay que especificar cómo será ese trabajo y dar cifras de cantidad. Así, un trozo de carbón tiene almacenada una cantidad de energía que se pone de manifiesto al arder, pues produce calor y éste puede realizar trabajo.

La energía se presenta bajo los más variados aspectos, pues la encontramos en un salto de agua de un río, en el calor que irradia el sol, en los combustibles, en el viento, en los seres vivos, en los productos químicos, en las olas del mar, etc. Unas veces en plena actividad, produciendo trabajo, otras veces almacenada esperando la oportunidad de entrar en acción.

Para poder estudiar la energía es menester definir el trabajo, pero no en su significado vulgar, que se refiere a la actividad de un individuo, sino en su concepto técnico. El trabajo como magnitud física es mesurable, se evalúa con números, como otras magnitudes físicas (fuerza, velocidad, distancia, etc.).

Trabajo

Si se aplica una fuerza a un cuerpo y lo mueve en un recorrido determinado, esa fuerza habrá cubierto una cierta distancia. Trabajo es el producto de la fuerza por la distancia recorrida. Así en el caso de una locomotora que tira de un tren, con una fuerza F y recorre una distancia d, el trabajo realizado vale:

$$T = F\,d$$

y como la fuerza se mide en Kg y la distancia en metros, resulta evidente que la unidad de trabajo será el Kilográmetro, es decir que el trabajo se medirá en Kgm.

Es éste el concepto físico del trabajo y aplicado a los casos vulgares se ve que resulta muy lógico, pues si en el caso de la locomotora arrastrando al tren, por ejemplo, el carbón que gasta depende del trabajo que está haciendo, es evidente que gastará más cuanto más pesado sea el tren, y cuanto mayor distancia recorra. Es lógico que para valorar el trabajo se debe multiplicar la fuerza por la distancia recorrida. En el caso de un individuo que sube un paquete por una escalera, el trabajo que realiza será tanto mayor cuanto más pese el paquete (fuerza) y cuanto más alta sea la escalera (distancia), de modo que su trabajo dependerá del producto de esas dos cosas, fuerza y distancia recorrida por la fuerza.

Según esto, se ve que cuando se aplica una

fuerza a un cuerpo, se puede desarrollar trabajo de inmediato o no, según ese cuerpo se mueva o se quede en reposo. Podemos ofrecer un ejemplo clásico teniendo en cuenta lo que ya sabemos, es decir que el peso de un cuerpo es una fuerza de la cual conocemos su magnitud, punto de aplicación, dirección y sentido. En efecto, la magnitud de esa fuerza es la que nos da la balanza; el punto de aplicación es el centro de gravedad del cuerpo, pues el peso se supone concentrado en el centro de masa; la dirección es la de la vertical, o recta que va desde el cuerpo hacia el centro de la Tierra; y, finalmente, el sentido es el de descenso.

Coloquemos al cuerpo sobre una repisa ubicada a una altura *d* sobre el suelo; el peso del cuerpo, o fuerza gravitacional es *F* (ver figura 52). Si se sacara bruscamente la repisa el cuerpo

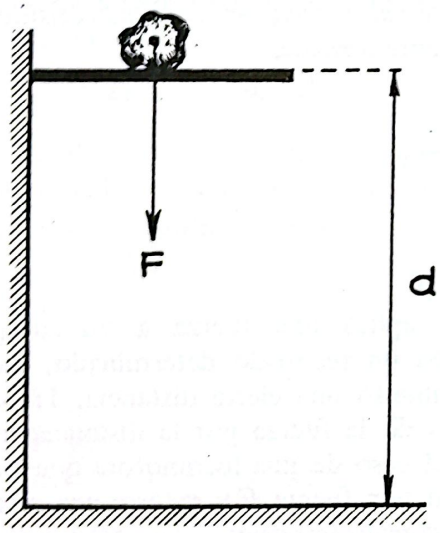


Fig. 52. – Un cuerpo que cae realiza un trabajo.

caería recorriendo la distancia *d*. Como una fuerza que recorre una distancia ha realizado un trabajo, ese trabajo sería:

$$T = F\,d$$

Pero si no se saca la repisa, esa cantidad de trabajo queda latente, almacenado, listo para realizarse en cuanto se pueda. ¿No es un caso de capacidad de producir trabajo? Evidentemente que sí, luego el cuerpo tiene almacenada una cantidad de energía, tanto mayor cuanto más alto esté colocado. Esa energía depende de su posición, entonces se la llama *energía de posición o potencial*. La cantidad de energía potencial que tiene ese cuerpo está dada por el trabajo que puede desarrollar, es decir por el producto *F d* ya dado.

Y si sacamos la repisa se desarrolla un trabajo. Ya no queda almacenada ninguna energía, se está poniendo de manifiesto y tiene un valor conocido, igual al trabajo que se está realizando. Esa energía es producida por el movimiento que hace la fuerza (peso del cuerpo, en este caso) luego se llama: *energía cinética o de movimiento.*

Tenemos clasificada a la energía en dos clases: potencial y cinética. La primera es cuando está almacenada, lista para ponerse de manifiesto en cuanto se provoque un cambio, se produzca una excitación, o se libere a la fuerza latente. La segunda es la que se pone en juego cuando se mueve un cuerpo y si se mueve es porque actúa una fuerza, que recorre cierta distancia. Luego el trabajo que realiza es precisamente esa energía cinética, dada por el producto de la fuerza actuante por la distancia recorrida. Sin embargo, no es ésta la única clasificación que se puede hacer de la energía, pues la anterior sólo se aplica a los cuerpos inertes, refiriéndose a su reposo o su movimiento, sin interesar la substancia de que están hechos, la que puede almacenar energía como el caso del trozo de carbón.

Vale la pena recordar un dispositivo que utilizamos para estudiar el movimiento oscilatorio, el péndulo, pues él es un caso clásico de transformación de la energía. La figura 53 nos muestra el conocido péndulo y veamos qué ocurre en sus distintas posiciones. En la posición extrema de la izquierda el péndulo está en reposo o sea provisto de energía potencial, ya que la fuerza actuante, el peso *P*, está en condiciones de producir trabajo. Sabemos que esa fuerza *P* da una componente *F* que es la que producirá el movimiento. En cuanto se inicia el movimiento comienza a aparecer la energía cinética y cuando pasa por la posición central ha desaparecido la energía potencial para ser toda cinética. En el movimiento desde el centro hacia la derecha se va perdiendo parte de la energía cinética y se va acumulando

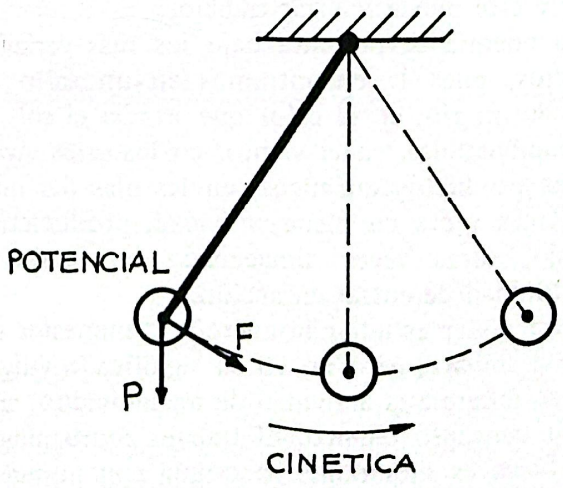


Fig. 53. – El péndulo es un ejemplo vivo de transformación de energía potencial en cinética y viceversa.

energía potencial mientras sube y al llegar al extremo derecho toda la energía es potencial, pues la cinética desapareció.

Estamos pues ante un caso de transformación permanente de energía potencial en cinética y viceversa; los valores de ambas son iguales en sus cifras máximas y en cada instante la suma de las energías cinética y potencial de una cifra constante, ya que no hay desaparición sinó transformación de energía. Cabe destacar que no tenemos en cuenta el efecto del roce con el aire que amortiguará el movimiento y aparecerá así una nueva transformación de energía, pero de esto hablaremos más adelante.

Potencia

Cuando una fuerza recorre una distancia se dice que hace un trabajo, pero no interesa si para hacerlo tarda un minuto o una hora. Piénsese en dos vehículos que tienen igual peso, pero uno de ellos recorre una distancia en la mitad del tiempo que emplea el otro. ¿Qué se pensará del primer vehículo? Que tiene más potencia, que su motor será más potente, ya que a igual fuerza a arrastrar, a igual peso y a igual distancia recorrida, es decir, a igual trabajo a realizar, uno lo hace en un tiempo y el otro en la mitad de ese tiempo. Surge así un nuevo concepto físico de la expresión vulgar. El concepto de *potencia,* que tiene su definición técnica.

Potencia es el trabajo realizado en la unidad de tiempo; el trabajo realizado por una fuerza en un segundo. Nótese la relación que hay entre el concepto físico de la potencia y el significado vulgar. En un segundo de tiempo el vehículo más potente recorrerá doble distancia que el otro, luego realizará doble trabajo, luego su potencia será doble. Se encuentran perfectamente coincidentes los dos conceptos.

Matemáticamente, si una fuerza realiza un trabajo en un tiempo dado, se puede expresar la potencia por el trabajo y el tiempo:

$$P = \frac{T}{t}$$

Donde T es el trabajo realizado por la fuerza, tomado en Kgm y t es el tiempo tardado en realizarlo, tomado en segundos. Luego resulta que la unidad de potencia sería el Kgm/s.

Como sabemos que el trabajo es igual al producto de una fuerza por la distancia recorrida, podemos poner en lugar de T, en la fórmula anterior, su equivalencia, o sea el producto $F\,d$ ya visto y se tiene:

$$P = \frac{F\,d}{t}$$

Resultando, lo mismo que antes, la potencia expresada en Kgm/s, ya que en el numerador se tiene Kg multiplicado por m y todo eso dividido por segundos.

En la Técnica, la unidad de potencia definida ha resultado un poco chica y se ha adoptado otra, más grande, que se llamó H.P. (de: Horse Power, caballo-potencia) y que equivalía a 75 Kgm/s:

$$1 \text{ H.P.} = 75 \text{ kgm/s}$$

Aunque han surgido algunas discrepancias entre esta denominación ya impuesta por la costumbre y la normalización de las unidades, pues en su origen el H.P. equivalía a una unidad de potencia de 33.000 libras-pie/minuto, pues la fuerza se tomaba en libras (0,454 gramos), la distancia se medía en pies (0,305 m) y el tiempo se contaba por minutos. De resultas de esas equivalencias el H.P. no da exactamente 75 Kgm/s sino que da 76,16 Kgm/s. Para evitar dudas, se pensó en llamar H.P. a esta cifra de 76,16 y C.V. (caballo-vapor) a la de 75 Kgm/s. Como la diferencia es reducida, la costumbre impuso la abreviatura H.P. asignándole una equivalencia de 75 Kgm/s. Pero técnicamente debe tenerse:

$$1 \text{ C.V.} = 75 \text{ Kgm/s}$$

Ejemplo. Supongamos que se desee instalar una bomba para extraer agua de un pozo y que sea menester una cantidad de 10.000 litros por hora. La profundiad del agua es de unos 40 metros. Se desea saber qué potencia debe tener el motor acoplado a la bomba, suponiendo que de él se aprovechara toda la energía que produce.

Calculemos primero la cantidad de trabajo a realizarse en una hora. Como cada litro de agua pesa un Kg, 10.000 litros pesarán 10.000 Kg. La distancia a recorrer por el agua es de 40 m, luego el trabajo será:

$$T = F\,d = 10.000 \times 40 = 400.000 \text{ Kgm}$$

Ahora calculemos la potencia. El tiempo en que debe realizarse esta cantidad de trabajo es

una hora, que tiene 3600 segundos, luego la potencia, trabajo realizado por segundo, valdrá:

$$P = \frac{T}{t} = \frac{400.000}{3.600} = 112 \text{ Kgm/s}$$

Y reduciendo esa potencia a C.V., se tiene.

$$\frac{112}{75} = 1{,}48 \text{ C.V.}$$

Que en la práctica resultará mucho mayor, porque no se aprovecha toda la energía producida por el motor.

Potencia en movimiento de rotación

Volvamos a considerar un cuerpo en rotación, por ejemplo la polea de un motor cualquiera y apliquemos a este caso las consideraciones relativas a la potencia, que hemos visto.

Supongamos un cuerpo en rotación (ver figura 54) al que se ha aplicado una cupla o momento

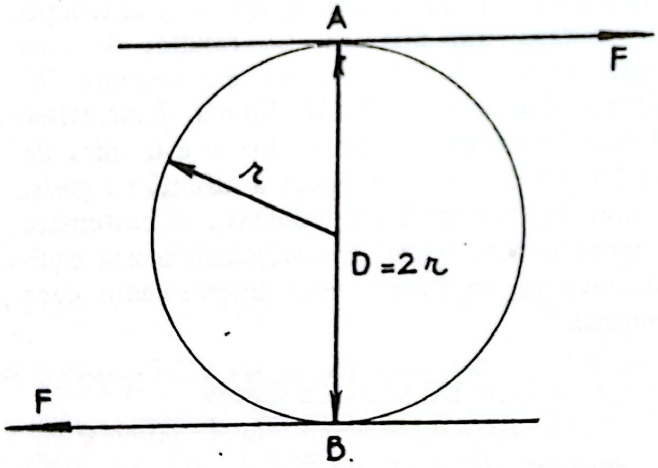


Fig. 54. — Aplicación del concepto de potencia a un movimiento de rotación.

de giro producido por un par de fuerzas F, según se ha visto. El radio a que están aplicadas esas fuerzas con respecto al eje es r. Supongamos también que por efecto de la cupla el cuerpo está girando a razón de n r.p.m. Calculemos el trabajo realizado por el momento de las fuerzas F en una vuelta completa. El camino recorrido será el desarrollo de la circunferencia:

$$d = 2 \pi r$$

Donde no debe confundirse d: distancia recorrida, con el diámetro de la circunferencia. Prosiguiendo, tenemos que el trabajo de cada fuerza F será igual al producto de esa fuerza por el camino recorrido:

$$T = F d = F 2 \pi r$$

Pero este es el trabajo realizado en una vuelta. Como el cuerpo da n vueltas en un minuto, el trabajo realizado en un minuto será n veces mayor:

$$T = F 2 \pi r n$$

Y la potencia es el trabajo realizado en un segundo, de acuerdo con la definición, de modo que se tiene:

$$P = \frac{F 2 \pi r n}{60}$$

Pero esta fórmula nos permite hacer algunas interesantes apreciaciones. En efecto, si al segundo miembro de la fórmula le sacamos la F, nos queda la expresión de la velocidad lineal de cualquiera de los puntos de la periferia, tales como el A de la figura 32 que vimos en el capítulo 4. Luego, la potencia que se desarrolla, por la acción de cada fuerza F, es:

$$P = F v$$

Es decir igual al producto de la fuerza (Kg) por la velocidad (m/s). Esto nos dice que si se tiene un motor de una potencia determinada, fija y lo hacemos girar despacio, se dispondrá de una fuerza periférica elevada y si lo hacemos girar ligero, la fuerza será menor. Es evidente que sucede así, pues si la potencia es invariable, debe serlo el segundo miembro de la ecuación y como está formado por el producto de dos cantidades, si una grande la otra debe ser chica y viceversa.

La primer conclusión que sacamos de esto es que los motores veloces usarán correas delgadas en comparación con los motores lentos de igual potencia, ya que la fuerza que soportan esas correas es mucho menor a gran velocidad, puesto que a gran v, es chica F. Viceversa, a menor velocidad aumenta F y debe colocarse una correa de mayor grosor para que soporte la tracción a que está sometida.

La segunda conclusión interesante sale de pensar que si queremos aumentar la velocidad de giro de una máquina, perderemos fuerza perisférica, pues la potenciá es invariable. Si no queremos perder fuerza periférica y queremos aumentar la velocidad de giro hay que disminuir

el diámetro de la polea. En efecto, observando la primera de las expresiones de la potencia, se ve que aparecen F r y n en el segundo miembro. Si la potencia es invariable, el producto de esas tres cosas también debe serlo, de modo que si se quiere conservar la fuerza, para aumentar n hay que disminuir r radio de la polea.

La dependencia de la potencia y la fuerza multiplicada por la velocidad hace comprender por qué es necesario aumentar la potencia del motor de los vehículos si se desea aumentar la velocidad, o sino hay que reducir el peso si no se desea aumentar la potencia, porque disminuyendo la fuerza a realizar aumenta la velocidad sin aumentar la potencia. Todo esto lo saben los corredores de automóviles cuando aligeran el vehículo, quitando todo peso inútil para conseguir mayor velocidad. También lo saben los fabricantes de automóviles cuando tratan de disminuir el rozamiento con el aire, dando a la carrocería formas aerodinámicas, para que el disminuir las pérdidas se aproveche más la potencia del motor en producir trabajo útil. Además, mejorando las formas exteriores disminuye la resistencia que opone al aire al movimiento y se reduce la fuerza necesaria a altas velocidades, con lo que se consigue tener más velocidad sin aumentar mucho la potencia.

Rozamiento

Si recordamos la constitución molecular de la materia será fácil imaginar que cuando dos cuerpos sólidos están en contacto el mismo no se cumple para toda la superficie sino que las moléculas superficiales de uno penetran un poco en los espacios vacíos del otro y viceversa; se produce una especie de *engrane* que impide o trata de dificultar el deslizamiento de un cuerpo sobre el otro. Esa acción de impedimento se llama *rozamiento.* Si entre ambos cuerpos se coloca una substancia pulvurenta o viscosa, el rozamiento disminuye notablemente y esa acción se llama *lubricación.* Un cajón colocado sobre una capa de arena se desliza con facilidad y una plancha de acero aceitada resbala fácilmente sobre otra plancha por la acción lubricante que elimina o por lo menos reduce el rozamiento.

En las maquinarias y motores debe lubricarse el contacto de las superficies metálicas para reducir el rozamiento entre partes móviles, que tienden a frenar esos movimientos. Si pensamos en las transformaciones de energía, estamos frente a una de ellas, pues el rozamiento produce calor en los cuerpos en contacto y ese calor es una forma de la energía. Solamente que tal energía calórica es una pérdida, pues se resta de la energía cinética de las partes móviles de la máquina.

Para estudiar el rozamiento comencemos por decir que hay dos clases: el de *resbalamiento* y el de *rotación.* El primero se refiere al caso de cuerpos que se deslizan uno contra otro y el segundo corresponde a los casos en que un cuerpo cilíndrico rueda sobre un plano.

Veamos primero la figura 55 que muestra el

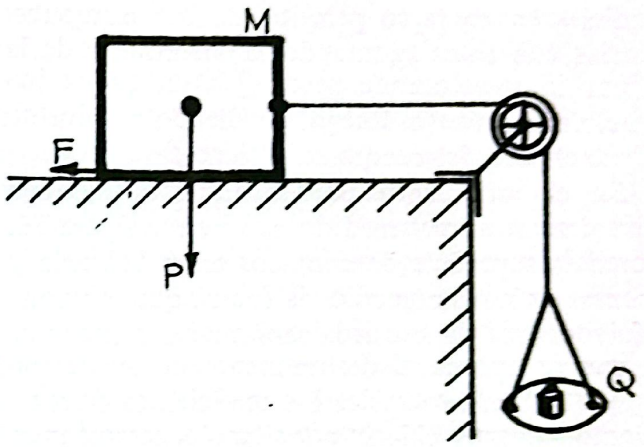


Fig. 55. – Forma en que se produce y se mide el rozamiento por resbalamiento.

caso de rozamiento por resbalamiento. Un cuerpo M está apoyado sobre un plano y si tiramos de la cuerda encontramos una resistencia al desplazamiento. Si colgamos un peso Q mediante la cuerda y una polea, conseguiremos que el cuerpo se deslice cuando el peso Q supere a la fuerza de rozamiento. Precisamente hemos marcado una fuerza F que representa al rozamiento como una oposición al resbalamiento.

La magnitud de esa fuerza F depende de la naturaleza de las superficies en contacto y, lógicamente, del peso P del cuerpo. Se puede dar una fórmula para calcular F y es:

$$F = f P$$

donde f es el llamado *coeficiente de rozamiento* que es el factor que depende de las superficies en contacto. Una vez que la pesa Q logra igualar a F se inicia el deslizamiento e inmediatamente puede colocarse una pesa más pequeña. Esto nos dice que el rozamiento de cuerpos en reposo es mayor que el de esos mismos cuerpos en movimiento. Por eso las tablas que dan ese coeficiente f tienen dos cifras: la de reposo y la de movimiento.

Por ejemplo, en las tablas que dan los manuales técnicos para el coeficiente de rozamiento encontraremos las siguientes cifras:

metal sobre metal, reposo, $f = 0{,}18$
metal sobre metal, movimiento, $f = 0{,}19$
madera sobre madera, reposo, $f = 0{,}50$
madera sobre madera, movimiento, $f = 0{,}36$

y la menor variación de los datos para reposo y movimiento en los metales se explica por ser menor en ellos la penetración de un cuerpo en el otro, cosa que es mayor en el caso de la madera, por ejemplo.

El hecho de que el coeficiente de rozamiento depende únicamente de la naturaleza de las superficies en contacto permite medirlo para substancias diferentes montando la instalación de la figura 55 y colocando pesos Q hasta que se inicia el deslizamiento. Luego, dividiendo el valor de Q por el peso del cuerpo se obtiene f.

En el rozamiento por rodadura el montaje para demostrarlo y medirlo se ve en la figura 56. Como la superficie de contacto entre la rueda y la mesa es mucho menor, la fuerza que se opone a la rodadura de la rueda será mucho menor que la que se oponía al deslizamiento de un cuerpo apoyado. En la rodadura los coeficientes de rozamiento son muy chicos; por ejemplo, acero contra acero, caso de las ruedas del tren sobre los rieles, ese coeficiente vale 0,02. Para determinarlo se colocan pesas Q en el platillo hasta que se inicia el rodamiento de la rueda M de la figura 56; el valor de Q, dividido por el peso P de la rueda, da el coeficiente f.

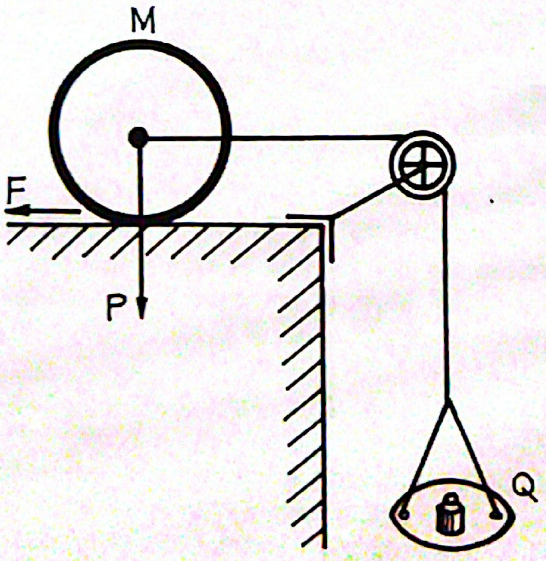


Fig. 56. – Forma en que se produce y se mide el rozamiento por rodadura.

Es evidente que el rozamiento representa una pérdida de energía pues las superficies en contacto de los cuerpos que rozan se calientan y esa cantidad de calor equivale a una cantidad de energía. Por ello se trata de reducir el rozamiento lubricando las superficies en contacto. En el caso de la rodadura no puede procederse así, pues si se lubrica la superficie la rueda resbala en lugar de rodar. También hay que tener en cuenta los casos donde el rozamiento se busca de intento, como es el caso de las correas aplicadas en poleas, los frenos, etc. Piénsese que si no existiera el razonamiento no podríamos caminar, pues los zapatos se deslizarían sobre el piso y permaneceríamos siempre en el mismo lugar.

Pérdidas de trabajo

Dijimos recién que no toda la energía producida por el motor es aprovechada; veamos por qué es esto. La energía se transforma, pero no aparece o desaparece como por encanto. Una cantidad de energía, después de una serie de transformaciones, debe quedar en igual cantidad. En una máquina hay ejes y los ejes giran dentro de los cojinetes. Al rozar dos metales entre sí, se produce un calentamiento de las superficies que rozan y sabemos que el calor es una manifestación de la energía. Pero esa energía que se pone de manifiesto en forma de calor y que será irradiada al aire sin poderse aprovechar, tiene que salir de algún lado, tiene que ser transformación de otra forma de energía. Es evidente que debe salir de la que suministra la máquina, de modo que no toda esta última se podrá aprovechar, puesto que una parte de ella se transforma en calor.

Igualmente, si echamos a rodar un vehículo debería seguir en movimiento siempre, pues la energía que se le comunicó le permitiría hacerlo. Pero las ruedas rozan con la superficie de apoyo, produciendo una pequeña transformación de energía cinética en calor (energía térmica): además el vehículo roza también con el aire, habiendo así otra producción de calor, con lo que la energía que llevaba el vehículo será poco a poco transformada toda en calor y el movimiento será frenado paulatinamente hasta que el vehículo se detiene.

Resumiendo, si se dispone de una cierta cantidad de energía nunca se puede transformar toda ella en trabajo, pues una parte se pierde inevitablemente. La cantidad aprovechada se llama: *trabajo útil*. La cantidad que se pierde se llama: *trabajo perdido*. La energía disponible, medida como un trabajo, se llama: *trabajo total* o producido en contraposición del útil o aprovechado.

Rendimiento

Es este un concepto de importancia fundamental en la Física. Toda la ciencia industrial se

aplica a veces para estudiar la forma de mejorar el rendimiento de una transformación de energía. La palabra de por sí es suficiente clara, pero el concepto técnico del rendimiento es más claro aun.

Se llama rendimiento al cociente entre el trabajo útil y el producido o total. De modo que si llamamos T_u al trabajo útil y T_t al total, el rendimiento estará dado por la relación:

$$r = \frac{T_u}{T_t}$$

O sea el cociente entre el trabajo aprovechado y el producido total. Es evidente que se deben tomar los dos trabajos en la misma unidad. También es evidente que el rendimiento será siempre menor que uno (1), pues si fuera igual a la unidad todo el trabajo se aprovecharía, ya que el útil sería igual al total, lo que sabemos es imposible.

En la práctica se acostumbra a dar el rendimiento en %, diciendo que una máquina tiene el 80 % de rendimiento, por ejemplo. Claro está que ese 80 % equivale a un cociente calculado con la fórmula anterior de 0,80; luego para expresar el rendimiento en % no hay más que multiplicar la relación anterior por 100:

$$r = \frac{100\ T_u}{T_t}$$

Supongamos por ejemplo el caso numérico de la bomba, dado como problema de aplicación. Dijimos en esa oportunidad que se consideraba que toda la energía se aprovechaba, cosa imposible. Corrijamos ahora el resultado de ese problema, admitiendo que sólo se podrá aprovechar un 40 % de la energía producida por el motor.

De acuerdo con ello, tomemos la expresión de rendimiento y despejemos de ella el valor del trabajo total:

$$T_t = \frac{100\ T_u}{r}$$

Y apliquemos esta nueva fórmula a nuestro problema. Si es válida para relación de trabajos, también lo será para relación de potencias, ya que éstas no son otra cosa que trabajos realizados en un segundo. Luego, conocemos la potencia útil necesaria, que había resultado 1,48 C.V.; sabemos que el rendimiento vale 40 %; substituimos estos dos valores en la fórmula anterior y se tiene:

$$P = \frac{100 \times 1{,}48}{40} = 3{,}7 \text{ C.V.}$$

De modo que en lugar de 1,48 C.V., como sería la cifra teórica, hacen falta 3,7 C.V. cifra real. Las conclusiones que se sacan de esto son simples: convendrá en todos los casos trabajar con máquinas del mayor rendimiento posible y encaminar todos los esfuerzos para mejorar el rendimiento de las existentes.

Transformaciones de la energía

Según sabemos, la energía no se crea ni se destruye; en todo proceso en que se pone en juego energía, hay una parte aprovechada y otra parte de pérdidas. Las manifestaciones naturales de la energía son muy variadas, pero se las puede agrupar en cuatro clases principales; las demás se pueden incluir en esas cuatro.

Tendremos así la energía mecánica que también hemos llamado cinética, y que se manifiesta en el viento, en los saltos de agua, en las mareas, etc. El segundo grupo lo forma la energía eléctrica, acumulada en las grandes masas, nubes y hasta en la Tierra misma. Sigue el tercer grupo, formado por la energía térmica, que la encontramos principalmente en la radiación de calor solar, en los volcanes, en los lagos subterráneos, etc. Y, finalmente, la energía química que está almacenada en los combustibles, en los explosivos, etc.

Cada una de estas manifestaciones de la energía es susceptible de ser transformada en otra, mediante un proceso natural o artifical. Todo el ingenio humano se ha aplicado a conseguir más y mejores transformaciones, o por lo menos a redu-

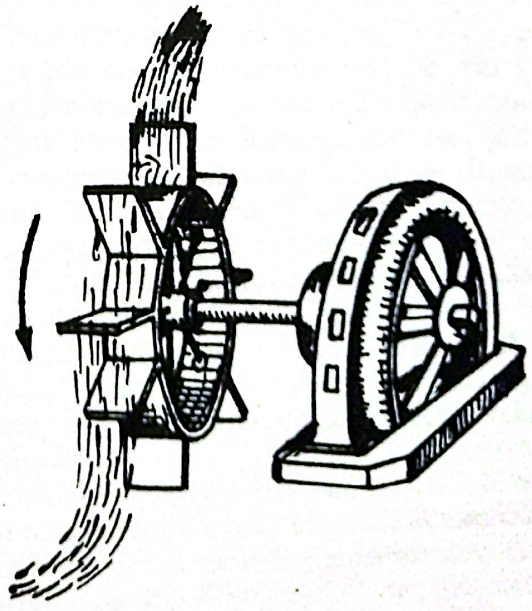


Fig. 57. – Transformación de energía mecánica en eléctrica.

aplica a veces para estudiar la forma de mejorar el rendimiento de una transformación de energía. La palabra de por sí es suficiente clara, pero el concepto técnico del rendimiento es más claro aun.

Se llama rendimiento al cociente entre el trabajo útil y el producido o total. De modo que si llamamos T_u al trabajo útil y T_t al total, el rendimiento estará dado por la relación:

$$r = \frac{T_u}{T_t}$$

O sea el cociente entre el trabajo aprovechado y el producido total. Es evidente que se deben tomar los dos trabajos en la misma unidad. También es evidente que el rendimiento será siempre menor que uno (1), pues si fuera igual a la unidad todo el trabajo se aprovecharía, ya que el útil sería igual al total, lo que sabemos es imposible.

En la práctica se acostumbra a dar el rendimiento en %, diciendo que una máquina tiene el 80 % de rendimiento, por ejemplo. Claro está que ese 80 % equivale a un cociente calculado con la fórmula anterior de 0,80; luego para expresar el rendimiento en % no hay más que multiplicar la relación anterior por 100:

$$r = \frac{100\ T_u}{T_t}$$

Supongamos por ejemplo el caso numérico de la bomba, dado como problema de aplicación. Dijimos en esa oportunidad que se consideraba que toda la energía se aprovechaba, cosa imposible. Corrijamos ahora el resultado de ese problema, admitiendo que sólo se podrá aprovechar un 40 % de la energía producida por el motor.

De acuerdo con ello, tomemos la expresión de rendimiento y despejemos de ella el valor del trabajo total:

$$T_t = \frac{100\ T_u}{r}$$

Y apliquemos esta nueva fórmula a nuestro problema. Si es válida para relación de trabajos, también lo será para relación de potencias, ya que éstas no son otra cosa que trabajos realizados en un segundo. Luego, conocemos la potencia útil necesaria, que había resultado 1,48 C.V.; sabemos que el rendimiento vale 40 %; substituimos estos dos valores en la fórmula anterior y se tiene:

$$P = \frac{100 \times 1{,}48}{40} = 3{,}7 \text{ C.V.}$$

De modo que en lugar de 1,48 C.V., como sería la cifra teórica, hacen falta 3,7 C.V. cifra real. Las conclusiones que se sacan de esto son simples: convendrá en todos los casos trabajar con máquinas del mayor rendimiento posible y encaminar todos los esfuerzos para mejorar el rendimiento de las existentes.

Transformaciones de la energía

Según sabemos, la energía no se crea ni se destruye; en todo proceso en que se pone en juego energía, hay una parte aprovechada y otra parte de pérdidas. Las manifestaciones naturales de la energía son muy variadas, pero se las puede agrupar en cuatro clases principales; las demás se pueden incluir en esas cuatro.

Tendremos así la energía mecánica que también hemos llamado cinética, y que se manifiesta en el viento, en los saltos de agua, en las mareas, etc. El segundo grupo lo forma la energía eléctrica, acumulada en las grandes masas, nubes y hasta en la Tierra misma. Sigue el tercer grupo, formado por la energía térmica, que la encontramos principalmente en la radiación de calor solar, en los volcanes, en los lagos subterráneos, etc. Y, finalmente, la energía química que está almacenada en los combustibles, en los explosivos, etc.

Cada una de estas manifestaciones de la energía es susceptible de ser transformada en otra, mediante un proceso natural o artifical. Todo el ingenio humano se ha aplicado a conseguir más y mejores transformaciones, o por lo menos a redu-

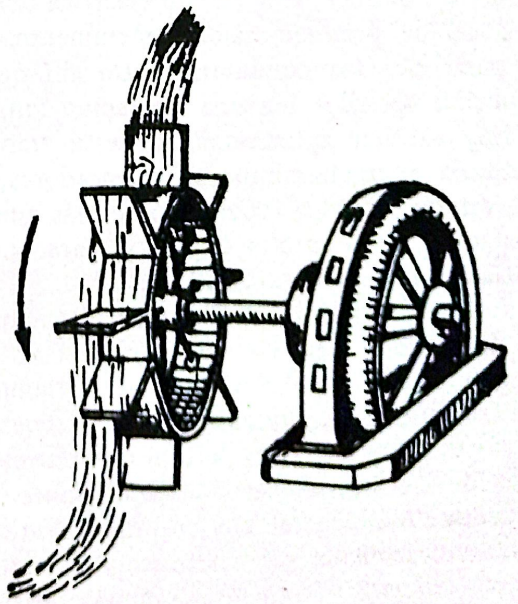


Fig. 57. – Transformación de energía mecánica en eléctrica.

cir las pérdidas inevitables en cada transformación. Hay algunas de éstas que no son comunes, pero no imposibles, ya que siempre la energía se puede transformar. Otras veces resulta más simple o conveniente hacer dos transformaciones sucesivas para llegar a una forma determinada, que hacer la directa.

Veamos algunos casos de transformación de energía, por lo menos los más comunes en la Física, para ilustrar al lector. Por ejemplo tenemos la transformación de energía mecánica en eléctrica. Hay innumerables ejemplos, pero el más común es el de las turbinas hidráulicas, que se mueven impulsadas por la energía cinética del agua (ver figura 57). Al girar la rueda arrastra el rotor de un generador eléctrico, y tenemos así la expresión más simple de una usina hidroeléctrica.

La transformación de energía eléctrica en mecánica es una operación inversa a la de generación de electricidad. En lugar de un generador eléctrico se utilizará un motor del mismo carácter. Con la electricidad se puede hacer girar un motor y con él se pueden accionar las más diversas máquinas, transformando una corriente eléctrica en un movimiento mecánico, que poseerá energía cinética.

Es innumerable la serie de formas que tendrá esa energía mecánica, pues no hay más que citar algunas de las máquinas de un taller que se accionan con motores eléctricos, como los tornos, cepilladoras, limadoras, agujereadoras, esmeriladoras, sierras, etc., para comprender que esta transformación de la energía, de eléctrica a mecánica, es la más usada, la más práctica y simple y la que debe de dar mejor rendimiento.

También tenemos transformación de energía eléctrica en térmica; la corriente eléctrica tiene la propiedad de producir calor directamente, con solo pasar por los conductores. De ahí que la producción de calor sea una operación tan simple. Hay muchas aplicaciones de esta transformación de energía, como los calentadores, cocinas, estufas, etc. En todas no hay más que dar vuelta una llave o apretar un botón para que dé comienzo o cese la transformación.

No terminan ahí los ejemplos de transformación de energía eléctrica en térmica. Hay otro más generalizado, que es el caso de las lámparas incandescentes de alumbrado. Lo que se busca en ellas no es calor sino luz, pero al calentar el filamento de las mismas hasta el rojo blanco, dan luz, aunque también calor, y en proporción desoladora. Actualmente se transforma la energía eléctrica en parte de energía térmica y parte de luz, directamente, mediante nuevos sistemas de iluminación, como son los tubos de neón, de mercurio, fluorescentes, etc. Se podría hablar de transformación de energía eléctrica en lumínica, agregando una nueva serie a la clasificación que dimos al principio, pero no hay tal exclusividad; parte de la energía eléctrica se transforma en térmica, parte sigue siendo eléctrica pero con ligeros cambios de naturaleza, y finalmente aparece la luz.

Todos los motores de combustión interna, a petróleo, nafta, gas-oil (figura 58), así como ciertos motores de gas, realizan una transformación combinada de energía química en térmica o mecánica. En ellos, el combustible se quema, produciendo una gran cantidad de calor, pero al mismo tiempo se produce una gran presión, que provoca una expansión, y aquí aparece la energía mecánica. Esa expansión arrastra o empuja un émbolo, produciendo un movimiento mecánico.

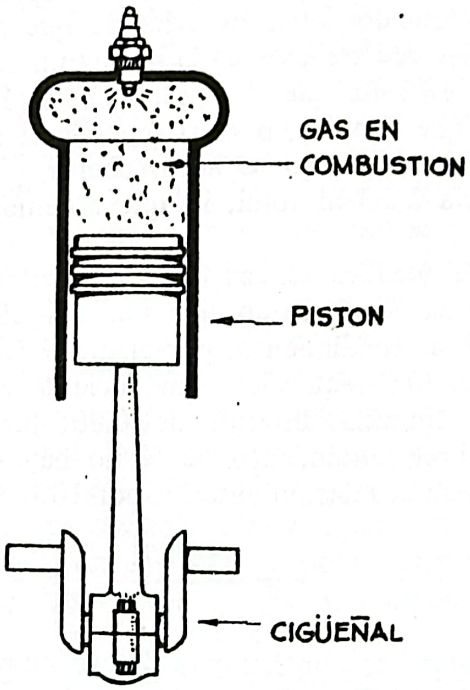


Fig. 58. – Transformación de energía térmica en mecánica.

En el caso de los motores de combustión interna, toda la transformación compleja se realiza en el mismo lugar, que es el interior del cilindro. En el caso de las máquinas a vapor y en las turbinas térmicas, hay dos lugares y dos procesos: primero la transformación de energía química en térmica, en la caldera, donde se produce vapor; luego se lleva ese vapor a la máquina en sí, donde se lo expande aprovechando la fuerza de expansión en producir el movimiento deseado.

Día 7

El hombre de por sí puede realizar esfuerzos y producir trabajo. Muchas de las operaciones que efectúa las hace con sus manos, otras mediante herramientas, pero hay una gran cantidad de cosas que no puede hacer sin el auxilio de aparatos que conviertan su esfuerzo limitado en otro mayor. Aquí entran en escena las máquinas, cuyo nombre nos hace pensar en una diversidad de piezas, ruedas y otros elementos que forman en conjunto un complicado aparato. Pero una barra de hierro apoyada en un trozo de madera, mediante la cual podemos levantar un pesado baúl, es también una máquina y la Física la estudia como una de las máquinas simples. Hay otras, y todas serán estudiadas en la jornada que abordaremos en esta oportunidad. Así veremos cómo puede transformarse el esfuerzo humano para que rinda mejor, realizando trabajos que estarían fuera de sus posibilidades por su magnitud o por la fatiga que ocasionarían. Y llegamos al momento de abordar el tema.

LAS MAQUINAS SIMPLES

A todo implemento o dispositivo que permite transformar movimientos, cambiar la acción de las fuerzas e inclusive hacer transformaciones de energía se le llama *máquina*. En el caso particular que la transformación sea de energía potencial en cinética, se le da el nombre de *motor*. En general la máquina reemplaza al hombre en sus tareas o realiza las que el hombre no puede ejecutar. En la Física no se estudian las máquinas en general sino aquellas que permiten realizar operaciones simples o primarias, y por ello reciben el nombre de máquinas simples.

El estudio de estas máquinas permite aplicar los principios de la dinámica que hemos visto, de modo que estaremos frente a una cantidad de ejercicios de aplicación. Por ese solo hecho este capítulo merecer ser estudiado con detenimiento. Los subtítulos que aparecen en adelante constituyen una enumeración de las máquinas simples más conocidas.

La palanca

Si hay una máquina simple que apareció instintivamente, es la palanca. El tomar una barra para mover un cuerpo pesado data de los albores de la civilización, pues una rama de árbol permitía mover una piedra pesada. En principio, una palanca tiene tres elementos esenciales: el punto de apoyo, el peso a mover y la fuerza que se aplica para lograrlo.

La figura 59 muestra una palanca del tipo más clásico y primitivo; una barra está apoyada en el punto *O*, uno de sus extremos se coloca debajo

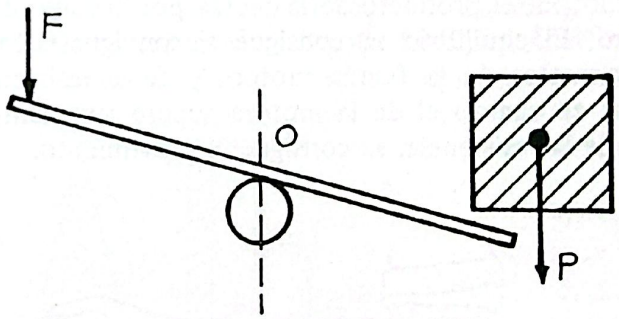


Fig. 59. La palanca es la más sencilla de las máquinas. Esta es de primer género.

del cuerpo que se quiere levantar, y cuyo peso es *P* y en el otro extremos se aplica la fuerza *F* que es la que hará el trabajo activo. En Física esos elementos se llaman: *potencia F, resistencia P* y *punto de apoyo O*. Hay que tener cuidado con el uso de la palabra potencia para denominar a una fuerza pues hemos visto en el capítulo 6 que potencia es otra cosa. Por tal motivo no usaremos la denominación clásica en Física sino que la cambiaremos por la de *fuerza motora*.

Una palanca en la cual el punto de apoyo se encuentra colocado entre la fuerza motora y la

resistencia es de *primer género*. Hay otros dos géneros de palancas según la ubicación de sus tres elementos. Por ejemplo, la figura 60 nos muestra la palanca de *segundo género*, que es aquella en

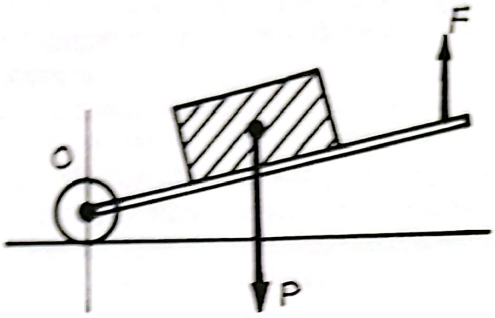


Fig. 60. – La carretilla es una palanca de segundo género.

la cual la resistencia *P* está colocada entre el punto de apoyo y la fuerza motora; el ejemplo muestra una carretilla, que es uno de los casos más conocidos de este tipo de palanca.

La figura 61 muestra la palanca de *tercer género*, en el cual la fuerza motora está colocada entre el punto de apoyo y la resistencia. Se trata del brazo humano, el cual tiene su punto de apoyo en el codo y la fuerza motora la realizan los músculos del antebrazo, mientras la mano sostiene el peso.

Considerando que mientras la palanca está en acción se produce un corto movimiento de rotación del punto de apoyo, podrá considerarse el *momento* de cada fuerza actuante (figura 17) dado por el producto de la fuerza por el radio de giro. El equilibrio se consigue si son iguales los momentos de la fuerza motora y de la resistencia; en cuanto el de la motora supere levemente al de la resistencia, se consigue el movimiento.

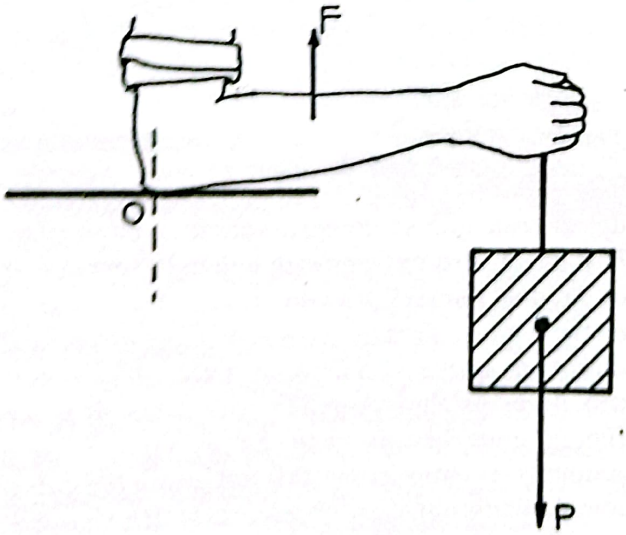


Fig. 61. – El brazo que levanta un paquete es una palanca de tercer género.

En la figura 62 se plantean las condiciones para los tres tipos de palanca, siendo en todos los casos *F* la fuerza motora, *P* el peso del cuerpo a mover o sea la resistencia, *a* el *brazo de palanca* o radio de giro de la fuerza motora y *b* el brazo de palanca de la resistencia. El equilibrio se consigue cuando se cumple la igualdad de momentos de esas dos fuerzas:

$$F\,a = P\,b$$

Donde, si las fuerzas se toman en Kg y los brazos en m, los momentos resultan en Kgm, como es sabido. Hay un detalle de interés y es que el

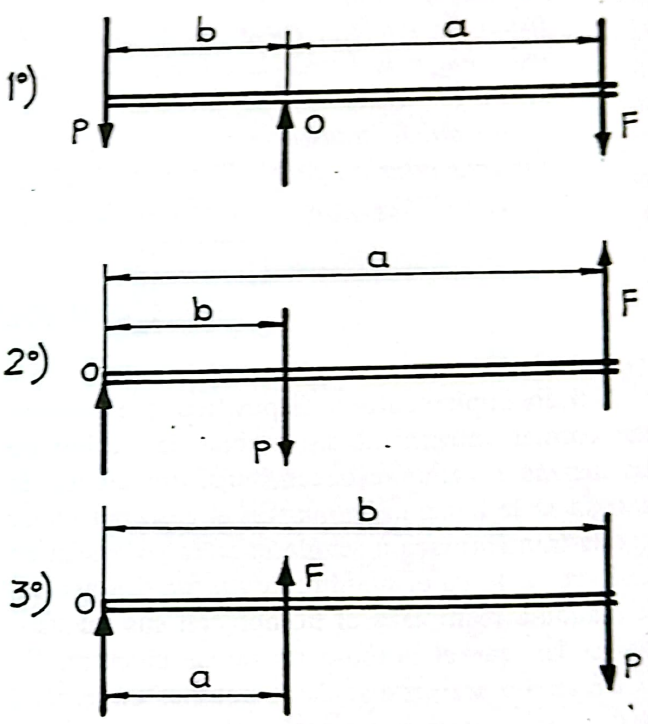


Fig. 62. – Fuerzas actuantes y brazos de palanca en los tres tipos.

sentido de la fuerza resistente es hacia abajo, porque representa un peso, pero el sentido de la fuerza motora es hacia abajo en el primer género pero hacia arriba en los casos 2° y 3°, cosa que se deduce simplemente de la observación de las figuras.

¿Cuál es la ventaja de usar una palanca para levantar un peso si lo mismo hay que realizar una fuerza? Un ejemplo numérico nos lo demostrará. Si con una palanca de 2 m de largo apoyada a 0,20 m de su extremo (figura 59) queremos levantar un peso de 100 Kg, la fuerza motora que debemos ejercer se deduce de la expresión de equilibrio de la palanca:

$$F = \frac{P\,b}{a} = \frac{100 \times 0{,}20}{2} = 10\ \text{Kg}$$

Lo que nos dice que haciendo una presión de un poco más de 10 Kg en el extremo de la barra podremos levantar los 100 Kg.

La balanza

Una aplicación de la palanca fue vista ya en la figura 38 pero sin mencionar en esa oportunidad el tema que estamos tratando ahora. Una palanca suspendida o apoyada en su punto central con dos platillos colgados de los extremos, es una balanza. La resistencia es el peso del objeto que se quiere pesar y la fuerza motora es el peso de las pesas calibradas que se colocan en el otro platillo. La balanza está en equilibrio cuando la aguja indicadora marca el cero de la escala, lo que ocurre cuando la barra está en posición exactamente horizontal. No importa la forma que se le dé a la barra ni a los platillos, pues hay muchas variantes constructivas; los brazos de palanca son iguales, de modo que el peso del objeto es igual al de las pesas.

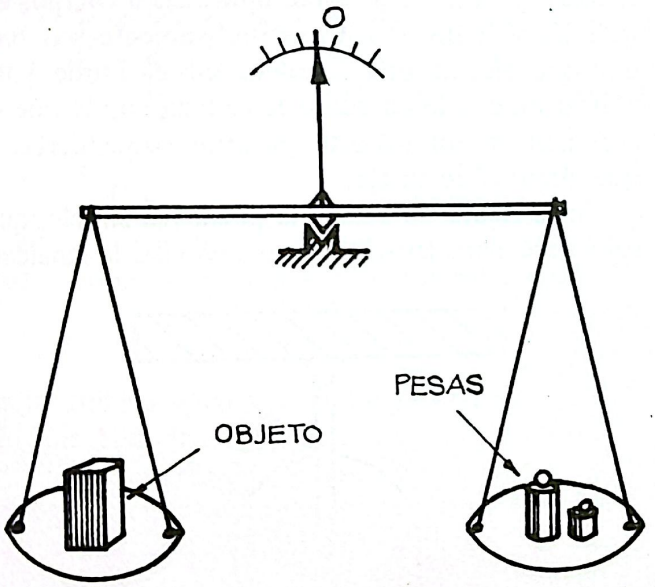


Fig. 63. – El tipo más simple de balanza, con brazos iguales.

Es de imaginar que para pesar cuerpos grandes resultan incómodas las pesas, además de que hay que ir sumando los valores de las distintas pesas que se colocan para equilibrar el peso del objeto. Por este motivo han surgido otros modelos de balanza, entre los que podemos citar la *romana* que se ilustra en la figura 64. Consiste en un barra que tiene dos ganchos, uno para colgarla y otro para suspender el objeto a pesar o el platillo donde se colocará ese objeto. El extremo largo de la barra tiene unas muescas que permiten fijar las posiciones donde se cuelga la pesa o contrapeso.

Para esta balanza se cumple la ecuación de equilibrio de la palanca, de modo que si usamos

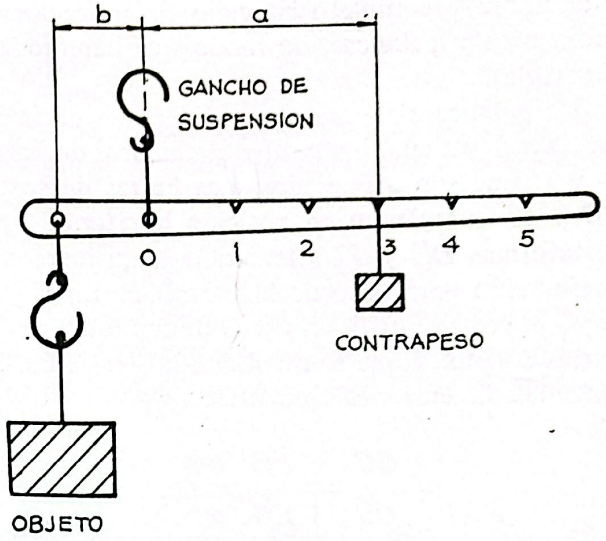


Fig. 64. – La balanza romana tiene brazos desiguales.

una pesa de 1 Kg y la colocamos en la primer muesca, que tiene un brazo *a* igual al *b* de la resistencia u objeto a pesar, el equilibrio se producirá cuando ese objeto pese 1 Kg. Si la pesa se coloca en la tercera muesca, caso ilustrado, el equilibrio se produce si el objeto pesa 3 Kg, porque la distancia del punto o muesca N° 3 hasta el centro de giro *O* es el triple de la medida *b*. Es evidente que se pueden colocar muescas intermedias para poder pesar fracciones de Kilogramo y que la pesa puede tener un peso distinto a 1 Kg, siempre que las muescas se coloquen adecuadamente, cumpliendo con la ecuación de equilibrio.

Otra balanza muy conocida es la *báscula* cuyo corte esquemático se ve en la figura 65. Se las

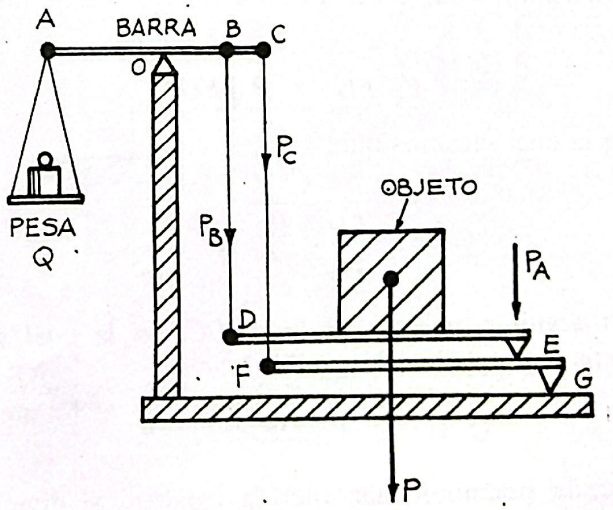


Fig. 65. – La báscula en corte esquemático permite medir pesos grandes.

construye para pesos medianos con relación 10 entre peso de objeto y pesa, y es la *decimal*, o con relación 100 para grandes pesos, y es la *centesimal*. El estudio de su funcionamiento es un

interesante y completo ejercicio de aplicación de momentos y palancas, de modo que haremos ese desarrollo.

La palanca tiene su apoyo en O, se cuelga la pesa en A y tiene dos puntos de amarre de barras B y C que son articulados. Las barras de sostén BD y CF mantienen en posición horizontal a las plataformas DE y FG, teniendo la primera una perforación para paso de la barra CF. En E y G hay apoyos de arista viva. Las dimensiones de las partes son tales que se mantiene una relación fija entre las dimensiones siguientes:

$$\frac{OC}{OB} = \frac{FG}{EG} = m$$

$$\frac{AO}{OB} = 10$$

Donde m es una cantidad cualquiera, pero la misma para ambas relaciones de medida constructivas y 10 es la relación válida para la báscula decimal, mientras que vale 100 para la centesimal; como elegimos la decimal para el estudio, dejamos esa cifra.

El peso P del objeto se reparte en P_A, una presión sobre el apoyo en E y una tracción P_B sobre la barra BD, pero cumpliéndose que:

$$P_A + P_B = P$$

Hay dos palancas a considerar; la primera es FG que es de segundo género y en la cual P_A es la resistencia y la tracción en la barra CF es la fuerza motora, o sea P_C. La ecuación de equilibrio es:

$$P_C \, FG = P_A \, EG$$

de la cual sacamos que:

$$P_C = \frac{EG}{FG} P_A = \frac{P_A}{m}$$

La segunda palanca es la $AOBC$, en la cual se tiene la condición de equilibrio:

$$Q \, AO = P_B \, OB + P_C \, OC$$

Donde podemos mantener la igualdad si dividimos a todos los miembros por OB y tendremos:

$$Q \frac{AO}{OB} = P_B + \frac{OC}{OB} P_C$$

Y donde reemplazando el cociente del primer miembro por la condición constructiva, el factor de P_C por su equivalente m y el producto resultante en el último término por su valor encontrado en la ecuación de la palanca FG, nos queda:

$$10 \, Q = P_A + P_B = P$$

Que dice que la pesa del platillo es la décima parte del peso del cuerpo a pesar, en la báscula decimal. De manera similar podríamos deducir que en la centesimal esa relación vale 100.

Las poleas

La polea es una máquina simple que permite levantar pesos con esfuerzos generalmente menores que tales pesos. Su funcionamiento es un ejemplo del equilibrio de los momentos de las fuerzas, ya que éstas están aplicadas a cuerpos en rotación (figura 18). Constructivamente son ruedas que tienen una canaleta en el borde para aplicar en ella la cuerda o la cadena con la que se accionan, y un soporte permite suspenderlas y que giren sobre su eje.

En la figura 66 vemos la polea fija simple, que solo sirve para levantar pesos; en ella, la igualdad

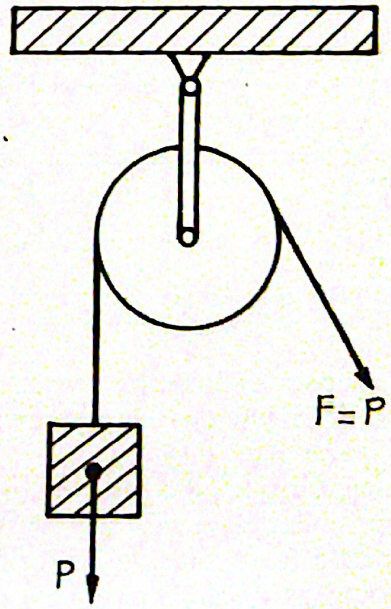


Fig. 66. Una polea fija se usa para levantar pesos.

de momentos de dos fuerzas de igual radio de acción nos dice que para levantar el peso P habrá que hacer una fuerza F igual a P.

La figura 67 muestra la combinación de una polea fija A con una móvil B. La soga de la que pende la polea B y el soporte de la polea A están amarrados al techo. La carga tiene un peso P, que se divide en dos partes iguales sobre las dos ramas de la soga que salen de la polea B y la

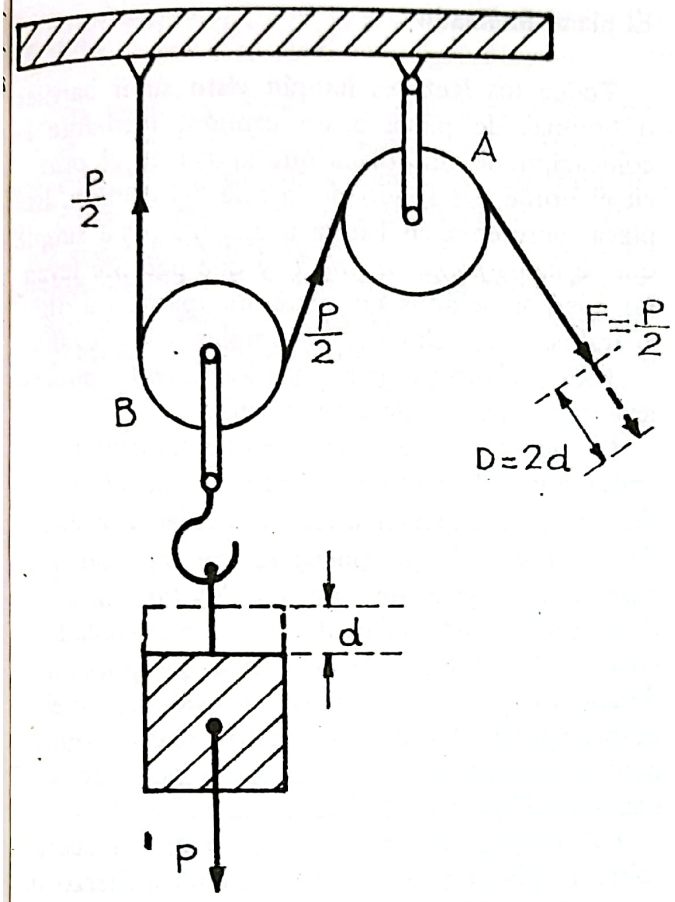


Fig. 67. – Combinación de poleas fija y móvil que reduce el esfuerzo.

polea *A* trabaja igual que la de la figura 66, de modo que la fuerza de tracción *F* vale la mitad de *P*. Si el recorrido de ascenso de *P* lo llamamos *d*, la soga en el extremo de aplicación de *F* avanzará una distancia *D* que vale, lógicamente 2*d*. Repitiendo el par de poleas *A* y *B* formando un tren de poleas fijas y móviles, se tendrá que el esfuerzo a realizar se divide por 4, por 8, etc.

Pero esos trenes de poleas son complicados para instalar y por ello se los reemplaza por el conjunto llamado *aparejo* o *motón* que vemos en la figura 68. Consiste en dos juegos de poleas, cada uno de los cuales tiene un soporte que une al grupo y que se llama cuadernal. El cuadernal superior, formado en este caso por las poleas *A* y *B* se cuelga del techo y el inferior, con las poleas *C* y *D*, queda suspendido del fijo y a él se amarra la carga *P*.

Cada par de poleas, una del cuadernal fijo y otra del móvil, por ejemplo la *A* con la *D* y la *B* con la *C*, se comportan como el par de la figura 67 y dividen la carga en dos partes; habiendo dos juegos la carga se dividirá por 4 y así sucesivamente. Para los cálculos se puede tomar como referencia el número total de poleas que tiene el aparejo, 4 en el caso ilustrado, y se tiene que:

$$F = \frac{P}{n}$$

donde *n* es esa cantidad de poleas. La distancia que recorre el extremo de la soga es *D* y la que sube el peso es *d*, cumpliéndose también que:

$$D = d\,n$$

Los aparejos se hacen con dos, tres y excepcionalmente cuatro poleas en cada cuadernal. Hay otros modelos en los cuales se usan poleas

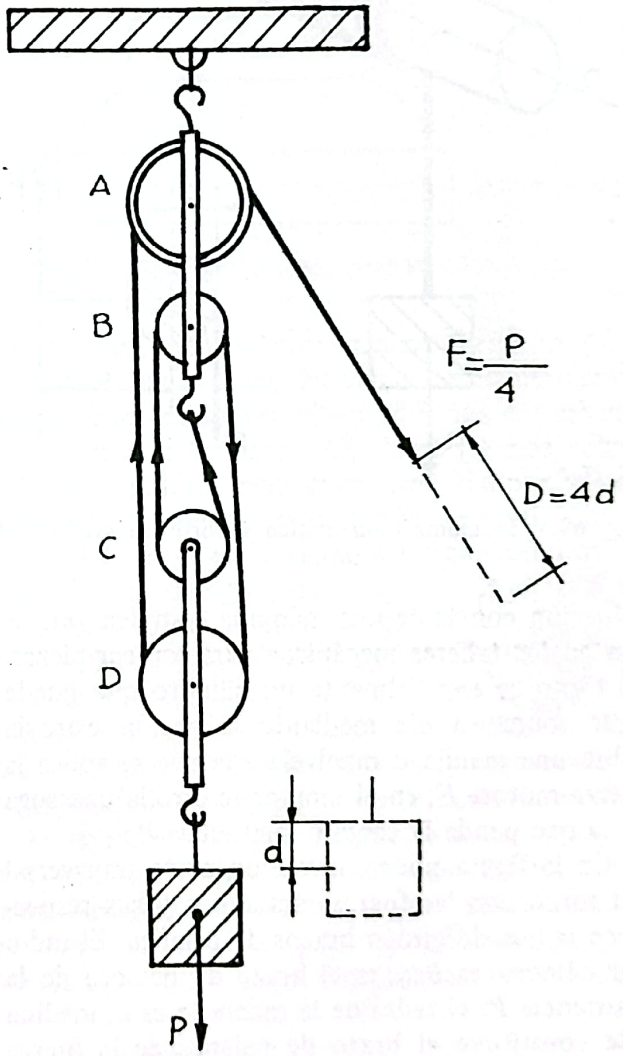


Fig. 68. El aparejo o motón con dos poleas en cada cuadernal.

de diámetros diferentes montadas sobre un eje común; otros tipos usan ruedas dentadas y cadenas en lugar de poleas de garganta lisa y sogas. Pero para nuestro estudio todo esto sólo representa la mención de su existencia y la aplicación en su funcionamiento de los principios básicos estudiados.

El torno

Otra interesante aplicación de los momentos de las fuerzas en rotación la tenemos en una máquina simple que vemos en la figura 69 y que se llama *torno,* no debiendo confundirse esta denominación con la de una máquina compleja que se usa en los talleres mecánicos para tornear piezas. El torno es esencialmente un cilindro que puede girar sobre su eje mediante la acción ejercida sobre una manija o manivela a la que se aplica la fuerza motora F; en el tambor se arrolla una soga de la que pende la carga o resistencia P.

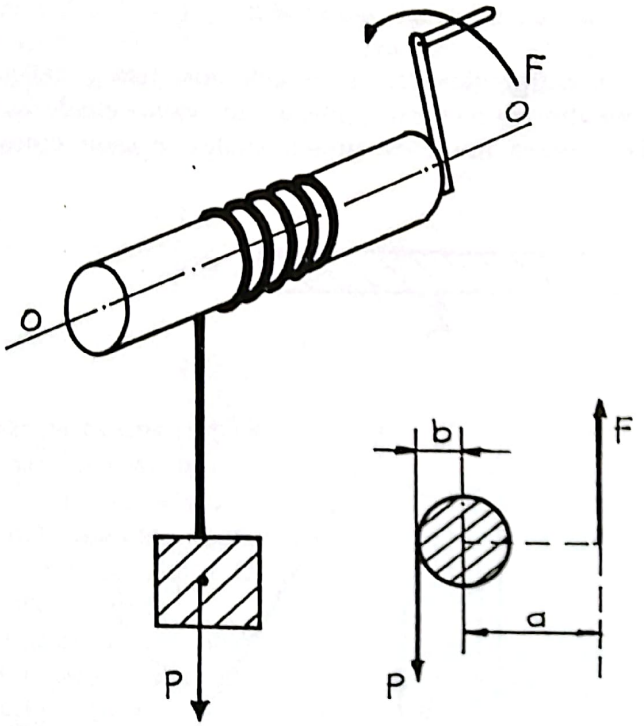


Fig. 69. – Diagrama esquemático y corte transversal del torno.

En la figura podemos ver un corte transversal del torno con las fuerzas actuantes y sus respectivos radios de giro o brazos de palanca. El radio del cilindro es b y es el brazo de palanca de la resistencia P; el radio de la manivela es a, medida que constituye el brazo de palanca de la fuerza motora F. La ecuación de la palanca nos da:

$$F\,a = P\,b$$

lo que nos dice que dando a la manivela un radio mayor que el del tambor se pueden levantar pesos con pequeño esfuerzo, ya que basta que a sea 4 veces b por ejemplo, para que la fuerza motora sea la cuarta parte de la resistencia. Este tipo de máquina simple se usa en minería, para hacer pozos y en las maquinarias de accionamiento de los ascensores.

El plano inclinado

Todos los lectores habrán visto subir barriles o bobinas de papel a un camión, mediante la colocación de una placa que apoya en el piso y en el borde del fondo de la caja del camión. Esa placa representa en Física a una máquina simple que se llama *plano inclinado* y que permite levantar cuerpos pesados sin ayuda de aparejos u otros aparatos. Generalmente se emplea para levantar cuerpos cilíndricos pero ocasionalmente pueden levantarse cuerpos de otras formas.

La figura 70 nos ilustra esquemáticamente la aplicación del plano inclinado, donde el objeto debe pasar del nivel a al nivel b mediante la acción de una fuerza F que puede ser de tracción o de empuje. El objeto tiene un peso P y tanto F como P se suponen aplicadas al centro de gravedad del cuerpo. Por lo que sabemos de la composición y descomposición de fuerzas, es evidente que el peso P puede ser descompuesto en dos componentes: una perpendicular al plano inclinado, que llamamos B y otra paralela al mismo, la A.

La componente B es una presión del cuerpo sobre el plano y se convierte en un esfuerzo de rozamiento (figura 56). La componente A representa la acción que tira al cuerpo hacia abajo, para evitar lo cual hay que aplicar una fuerza F igual y contraria. Luego tenemos dos situaciones: primero, equilibrar la acción de A mediante una fuerza F que impida que el cuerpo resbale; segundo, vencer el rozamiento que provoca B para

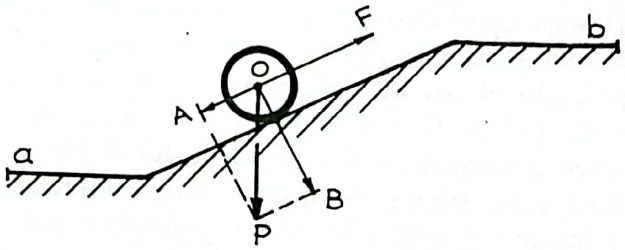


Fig. 70. – Principio de aplicación del plano inclinado.

levantar el peso hasta llevarlo al nivel b. Ambos problemas son conocidos y sabemos resolverlos.

Por construcción gráfica podemos determinar el valor de A y de B si P es conocido. Esto nos da un valor para la fuerza F que equilibra la caída. Por conocimiento del coeficiente de rozamiento entre el cuerpo y el plano, que será f, calculamos:

$$f\,B$$

y obtenemos un valor adicional para F que es el que permitirá subir al cuerpo. Claro que la suma de las dos partes de F debe ser superada para producir el movimiento hacia arriba del cuerpo

La cuña

Otra máquina simple que tiene diversas aplicaciones en la práctica, es la *cuña* cuyo principio esquemático vemos en la figura 71. Se trata de un cuerpo prismático de base triangular *ABC*, cuya arista de menor ángulo se aplica al punto de accionamiento de la cuña, mientras que la fuerza de acción se aplica a la cara opuesta a esa arista. La cuña se usa para partir un objeto, caso del hacha, para separar dos cuerpos pesados, para levantar un cuerpo, etc. Otras veces permanece en reposo en lugar de tener un movimiento de avance, como sería el caso de evitar el resbalamiento de un cuerpo en el plano inclinado, cuando debe suspenderse momentáneamente la acción de subida.

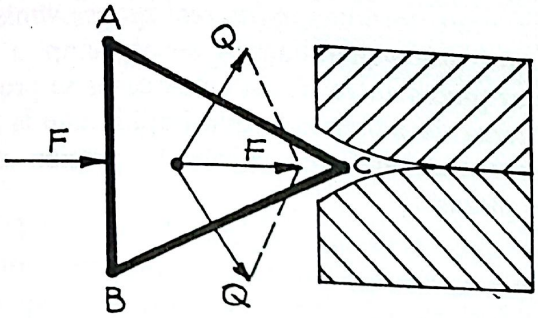


Fig. 71. – Principio de aplicación de la cuña.

La fuerza actuante sobre la cuña, sea de empuje o de percusión, se divide en dos componentes que llamamos Q en la figura 71, y que son perpendiculares a los planos laterales de la cuña. Hay una relación entre las proporciones de F y Q y las dimensiones de la base del prisma, lados del triángulo ABC. Se tiene, por simple comparación de triángulos:

$$\frac{Q}{F} = \frac{AC}{AB}$$

La construcción gráfica del diagrama de fuerzas nos dice que con ciertos valores de la fuerza F ejercida se logran mayores valores del esfuerzo lateral Q y tanto mayores cuanto mas alargado sea el triángulo ABC, o sea cuanto más afilada sea la cuña. Esto explica la forma que tienen las hachas y otros instrumentos cortantes.

El tornillo

Otra máquina simple muy difundida en la práctica es el tornillo, una de cuyas variantes se ve en la figura 72. Se trata de un cilindro que

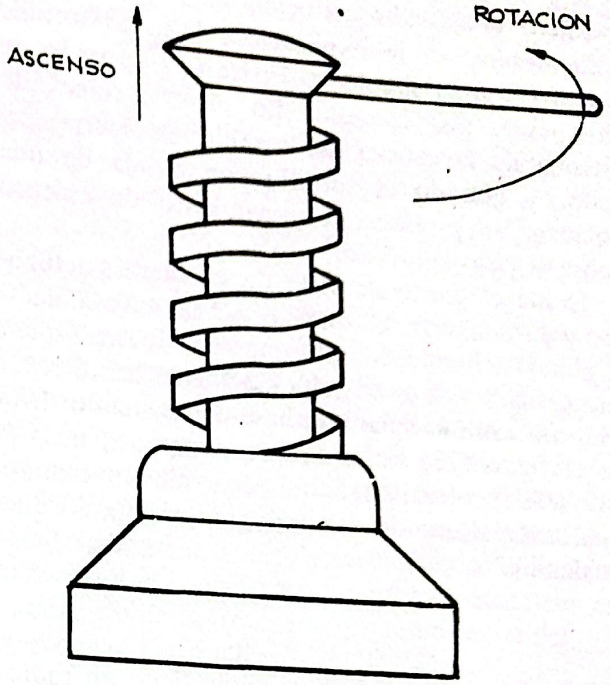


Fig. 72. – El tornillo usado para levantar pesos.

presenta una aleta saliente que no forma un plano perpendicular al eje del cilindro sino un cierto ángulo. Para poder ver cómo se forma ese saliente acudimos a la figura 73, donde hemos colocado un cilindro cuya base tiene radio r y un triángulo de papel en posición vertical, cuyo canto AB apoya en una generatriz del cilindro; la base BC del triángulo tiene una longitud igual a la circunferencia de la base del cilindro. Si arrollamos el papel sobre el cilindro, el borde AC se verá como una línea que va bajando desde A hasta B al mismo tiempo que da la vuelta al cilindro. Tal línea se llama *helicoide* y representa a un filete del tornillo que tenemos en la figura 72.

El tornillo se coloca en una base con un agujero cilíndrico, que tiene una acanaladura también helicoidal, de modo que girando el tornillo penetra o sale de la base según el sentido que demos al giro. El juego tornillo-tuerca es un dis-

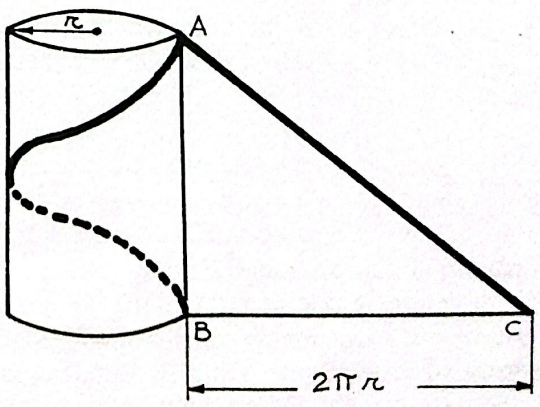


Fig. 73. – Desarrollo de un filete del tornillo.

positivo demasiado conocido para que debamos extendernos en la explicación. Pero el tornillo como máquina simple en Física sirve para levantar pesos, por ejemplo. En efecto, colocando encima de la cabeza del tornillo un cuerpo pesado, y girando el tornillo con ayuda de una palanca, se produce el movimiento de ascenso sobre el peso colocado.

Desde el punto de vista de las fuerzas actuantes y su accionar, el tornillo puede ser asimilado al plano inclinado. Si aplicamos una fuerza F para hacerlo girar, en una vuelta esa fuerza habrá recorrido un camino igual a la base del triángulo ABC de la figura 73. En el mismo tiempo, el peso P que se debe levantar habrá recorrido un camino igual a la altura de ese triángulo, de modo que igualando los trabajos realizados por ambas fuerzas, se tiene:

$$P\,AB = F\,BC$$

Y si la palanca que lo hace girar tiene un radio de giro distinto que BC se tomará el radio real de giro. La igualdad anterior nos permite calcular el valor del peso a levantar:

$$P = \frac{BC}{AB}\,F$$

De cuya relación deducimos que, independientemente del brazo de palanca que pueda permitir ejercer la fuerza F a distancia, se pueden levantar grandes pesos haciendo que la base del triángulo ABC sea grande con respecto a la altura. Esto, en términos geométricos, se traduce en que los filetes del tornillo están cerca uno de otro; como la distancia entre filetes se llama *paso* del tornillo, se usan pasos pequeños en relación con el diámetro.

El filete ilustrado en la figura 72 es de sección cuadrada, pero son mas comunes los filetes de sección triangular, que es seguramente el tipo de tornillo que más conocen los lectores. No siempre se usan tornillos para realizar movimientos sino que más generalmente se los emplea para asegurar piezas entre sí. En estos casos se provoca una fuerza de adherencia que impide que la tuerca gire sola para que afloje la presión entre ambas piezas.

Día 8

La mayor parte de los temas estudiados hasta aquí se referían a cosas que pasaban con los cuerpos sólidos, pero debemos tener en cuenta que en la naturaleza también existen los líquidos y los gases y que ellos están sometidos a los fenomenos físicos naturales o provocados por el hombre. Claro, resulta más cómodo hablar de los sólidos porque ellos se quedan donde los dejamos y si los movemos conservan su forma al pasar de una posición a otra. Pero esto no es obstáculo para que estudiemos lo que ocurre con los líquidos y con los gases. Subdividiremos estos dos asuntos en dos capítulos y dedicaremos la presente jornada al estudio de los líquidos, dejando los gases para la próxima. Entonces, abordaremos ahora la consideración de los líquidos en reposo y en movimiento, o sea de la Hidrostática y de la Hidrodinámica, ambas partes de la Física que integran la Hidráulica. Entremos pués en materia.

ESTUDIO DE LOS LIQUIDOS. HIDRAULICA

Hasta aquí hemos estudiado el estado de reposo y de movimiento de los cuerpos sólidos a los que aplicamos los principios de la Estática y la Dinámica. Pero en la naturaleza no hay solamente cuerpos sólidos, sino que encontramos líquidos y gases. En este capítulo nos ocuparemos de los líquidos. Se hace una división importante en tal estudio, cuyo conjunto constituye la Hidráulica; los líquidos en reposo corresponden a la Hidrostática y los líquidos en movimiento se estudian en la Hidrodinámica.

Las palabras usadas para agrupar el estudio nos dicen que se supone al agua como el líquido a considerar y es porque es el que más abunda en la naturaleza. Las leyes que estudiaremos se pueden aplicar a otros líquidos, con las correcciones a efectuar por la diferencia de densidad y, en algunos casos, por otras diferencias que presentan en la viscosidad, adherencia, etc. Pero esas particularidades solo interesan a los estudios de tecnología industrial, de modo que nos limitaremos a nuestro tema.

Hidrostática. Presión

Los líquidos en reposo, tanto los que están contenidos en recipientes como los de los mares y lagos, cumplen con una serie de leyes físicas. En todas ellas desempeña un papel importante un concepto que consideraremos básico, el de la *presión*. Se define por presión a la fuerza actuante sobre la unidad de superficie. Así, si sobre un piso de una habitación hay una gran cantidad de arena, que en total pesa unos 10000 Kg y está repartida uniformemente, y el piso de la habitación tiene unos 50 m^2 de superficie, se puede calcular la presión que soporta el piso, pues se divide simplemente la carga total por la superficie:

$$p = \frac{P}{s} = \frac{10000}{50} = 200 \text{ Kg/m}^2$$

Es decir que la presión que ejerce la arena sobre el piso es de unos 200 Kg por m^2.

En el caso de los líquidos, si están dentro de un recipiente ejercen presión sobre el fondo debido a su peso, pero también ejercen presión sobre las paredes. Para comprobarlo no hay más que hacer un orificio en un costado y cubrirlo con una placa. Llenando el recipiente de líquido la presión actuante sobre las paredes empujará la placa, saliendo el líquido.

Principio de Pascal

Se enuncia diciendo que la presión ejercida en un punto de una masa líquida se transmite por igual en todas direcciones. Veamos al efecto la figura 74. Se trata de un recipiente esférico, con un saliente cilíndrico en el que se ha colocado un pistón a efectos de ejercer una presión. Si se comprime el pistón con una cierta fuerza, sabe-

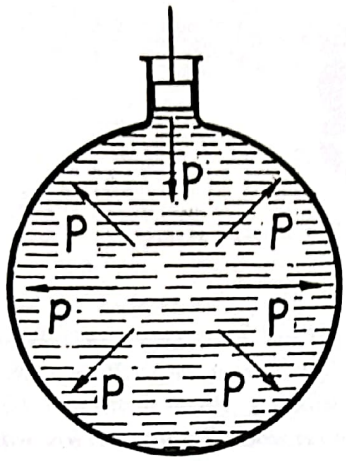


Fig. 74. – Según el principio de Pascal la presión p es idéntica en todas direcciones.

mos que la presión ejercida en el líquido será igual al valor de esa fuerza dividido por la superficie de la cara del pistón. Llamemos p a tal presión. En todas direcciones, según Pascal, se transmite la misma presión p y se puede comprobar fácilmente, pues basta dotar a la esfera de muchos orificios, y se observará que el agua sale por todos con igual fuerza.

Líquidos con superficie libre

Supongamos un recipiente abierto en su parte superior como el ilustrado en la figura 75 y que contiene líquido hasta cierta altura. En un costado del mismo hay un orificio con una tapa exterior. Sobre la superficie libre del líquido y sobre la parte exterior del tapón actúa la presión atmosférica, de modo que la placa, de acuerdo con el principio de Pascal, recibirá la presión atmosférica en sus dos caras. En efecto, la presión atmosférica aplicada a la superficie superior del líquido se transmite con igual valor en todas direcciones

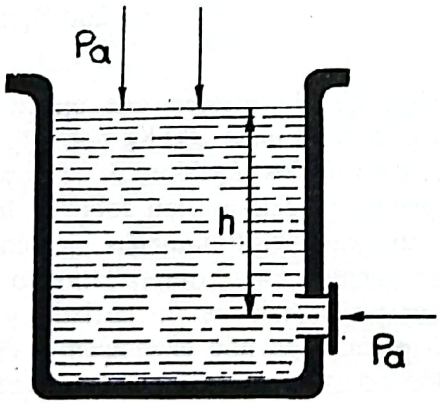


Fig. 75. – La presión atmosférica actúa sobre líquidos con superficie libre.

dentro de la masa líquida, y, por consiguiente, la placa la recibirá con idéntico valor que la que recibe por fuera, ya que la sección del orificio es la misma.

Pero sobre la placa actúa otra presión y es la que se debe al peso del líquido. También de acuerdo con el principio de Pascal, pensemos que a la altura del eje del orificio hay un fondo intermedio supuesto. Sobre él está apoyada la columna líquida que tiene una altura h, indicada en la figura, una superficie igual a la del fondo y un peso específico que llamaremos e. Calculemos la presión que ejerce esa columna líquida sobre ese fondo simulado y será la misma que actúa sobre el orificio, de acuerdo con el principio de Pascal.

Para ello llamemos S a la superficie de tal fondo supuesto y el volumen de la columna líquida será:

$$V = S\,h$$

Y el peso, siendo e el peso de cada m^3, será:

$$P = S\,h\,e$$

Luego la presión, o peso que actúa sobre la unidad de superficie, se calculará dividiendo la fuerza o peso total por la superficie del fondo y se tiene:

$$p = \frac{s\,h\,e}{s} = h\,e$$

Y surge así un concepto muy importante, que dice que la presión que ejerce el líquido contenido en un recipiente sobre cualquier punto de las paredes o del fondo, está dado por el producto de la altura líquida desde ese punto hasta la superficie, multiplicada por el peso específico del líquido, sin importar la superficie sobre la que actua. Para el agua, por ejemplo, como se puede tomar el peso específico igual a 1000 Kg/m^3, se puede simplificar la expresión de la presión si se toma una superficie de 1 m^2. Sobre ella actuará una presión dada por el producto de la altura líquida tomada en metros por la densidad que vale 1000. Luego, la presión sobre cualquier punto de la superficie igual a 1 m^2 en las paredes o fondo del recipiente, está dada por la altura en metros que hay desde ese punto hasta el nivel superior del líquido, multiplicada por 1000.

Empuje sobre las paredes

De acuerdo con las consideraciones anteriores es evidente que se podrá calcular el efecto total que hace el líquido sobre toda la pared, o sobre

una porción de ella. Para ello bastará multiplicar la presión por la superficie de la pared, según sabemos. Ese efecto se llama *empuje* y es muy importante en el caso de los diques de embalse, tanques, etc., donde debe tenerse en cuenta para dar suficiente espesor a las paredes.

La única salvedad que hay que hacer es que si se supone la presión como resultado de tomar la altura líquida que hay desde la superficie libre superior hasta el centro de la pared, se comete un error, que será pequeño si el tramo de pared que se considera está muy profundo en el líquido, pero que será importante si es un dique, por ejemplo, que tiene poca profundidad. No corresponde aquí hacer el cálculo exacto del empuje para cada caso, cada forma de pared y cada profundidad de la misma, pues en los casos que nos interesan, como es el de las máquinas hidráulicas, se tiene generalmente gran altura y poca superficie, de modo que el error no será importante.

Principio de Torricelli

Si se toma un tubo de vidrio y se lo llena de agua u otro líquido, volviéndolo luego de modo que quede el agujero para abajo, el líquido no se derramará (figura 76). Torricelli postuló que eso

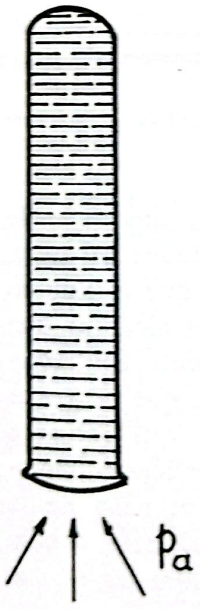


Fig. 76. – Según Torricelli, un tubo lleno de líquido lo mantiene si lo damos vuelta.

era debido a que la presión atmosférica actuaba sobre la superficie libre del líquido. Ahora bien, se sabe que la presión atmosférica depende del lugar geográfico en que está la referencia, pero en líneas generales ella es algo más de 10.000 Kg/m² (más exactamente 10.330), de modo que se puede calcular para cada líquido cuál es la altura de la columna que puede ser soportada sin que se derrame.

Para el agua, por ejemplo, sabemos que cada metro, de altura equivale a una presión de 1.000 Kg/m², de manera que la presión atmosférica es capaz de soportar una columna de agua de 10 metros de altura dentro de un tubo (claro está que sobre el agua, en el otro extremo del tubo, debe haber el vacío perfecto). Para el mercurio, sabemos también que esa columna puede tener 0,76 m de altura. Y así para los demás líquidos, la altura posible de la columa se calcula diviendo la presión atmosférica por la densidad del líquido.

Este principio da origen a una inmediata aplicación. Si se toma un tubo y se lo sumerge por un extremo en un líquido, por ejemplo agua y se aspira haciendo una succión en el otro extremo, hay derecho a pensar que la columna líquida se elevará hasta la altura que recién calculamos, porque sobre el líquido actúa la presión atmosférica. Pero en la práctica esto no ocurre, pues hay varias razones que conspiran en contra de esa altura teórica. En primer lugar, al hacer succión se emulsiona parte del aire dentro de la columna líquida, con lo que se produce una pérdida de carga y una nueva reducción de la altura de la columna. En resumen, la tal altura que dijimos era teóricamente de 10 metros, queda reducida en la práctica a unos 7 metros. Esto tiene gran importancia en las bombas, según veremos.

Vasos comunicantes

Los principios antes enunciados permiten realizar diversas comprobaciones y presentar particularidades interesantes en el comportamiento de los líquidos. Por ejemplo, si se comunican dos recipientes de diferentes dimensiones por un tubo colocado en la parte inferior, tal como lo muestra la figura 77, el líquido alcanzará el mismo nivel en ambos vasos, que se llaman *comunicantes*. Es decir que los niveles *A* y *B* coinciden.

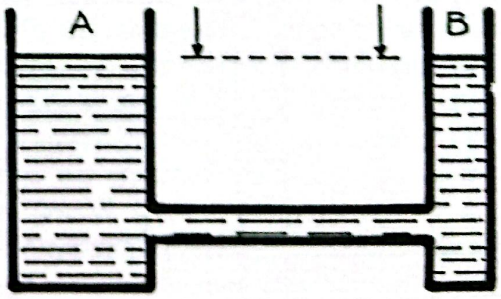


Fig. 77. – El principio de los vasos comunicantes.

Una aplicación inmediata de esto son los indicadores de nivel que se usan en las calderas, pues

como son recipientes de hierro, no se puede ver el interior. Entonces, se practican dos orificios, uno en la parte inferior, cerca del fondo y otro arriba, cerca de la tapa; esos orificios se comunican con un tubo de vidrio, tal como lo muestra la figura 78. El conjunto constituye un caso de vasos comunicantes, y permite apreciar el nivel del líquido *A* dentro de la caldera por coincidir con el nivel *B* en el tubo.

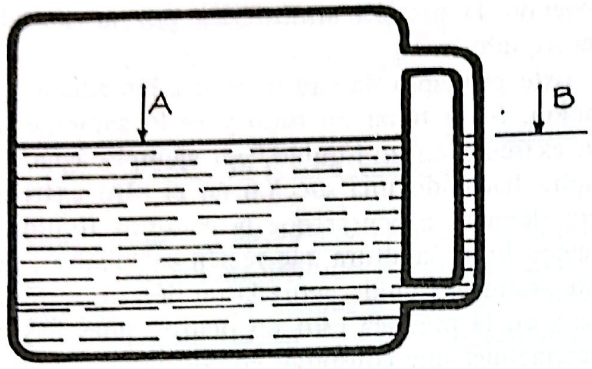


Fig. 78. – El indicador de nivel es una aplicación de los vasos comunicantes.

Este principio se usa para otros tipos de aparatos y se presenta en la naturaleza bajo diversos aspectos. Las aguas de un lago aparecen sobre la superficie de los terrenos próximos cuyo nivel esté por debajo de la superficie del algo. La distribución de agua en las ciudades se hace desde un tanque elevado por medio de cañerías; en las canillas el agua sale para buscar el nivel superior del depósito. Y así hay otros ejemplos de vasos comunicantes.

Capilaridad

Trataremos ahora un fenómeno que aparenta una contradicción con respecto a los vasos comunicantes y que ocurre en los tubos de pequeño diámetro que se sumergen en un líquido, figura 79. Hemos mencionado ya la adherencia (figuras 6 y 7) y sabemos que la tensión superficial de los líquidos juega un papel importante. Ese fenómeno se manifiesta de forma tal que el contacto entre un líquido y un sólido forma generalmente una superficie curva, pero lo curioso es que esa curva se puede presentar como cóncava o convexa. Y es que además de la adherencia se halla presente la cohesión del líquido. Si la adherencia es mayor que la cohesión, la superficie adquiere el aspecto dado en la figura 79 y si la cohesión supera a la adherencia, las superficies de contacto entre sólido y líquido adquieren la configuración de la figura 80. El que ocurra una cosa o la otra depende de la naturaleza del sólido y del líquido en contacto; por ejemplo, el fenómeno es apenas visible en el caso de agua en vidrio pero es muy notable si el líquido es el mercurio. Si el vidrio se cubre con parafina, el agua forma una superficie curva bien visible. En general los líquidos densos presentan mayor cohesión y los flúidos mayor adherencia.

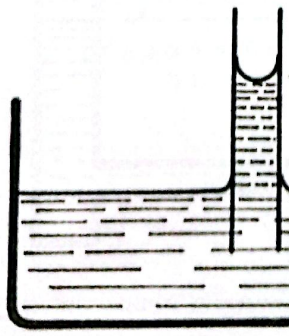


Fig. 79. – Fenómeno de capilaridad. La adherencia vence a la cohesión y hay menisco ascendente.

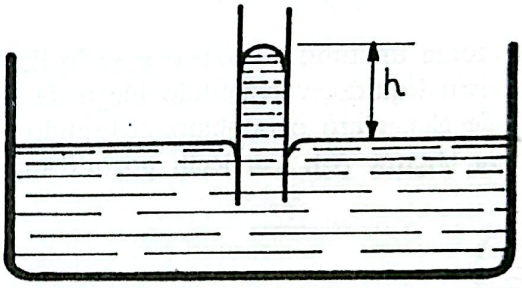


Fig. 80. – La cohesión vence a la adherencia y hay menisco descendente.

Pero aparte de la forma de la superficie de contacto entre el líquido y las paredes del tubo, está presente otro fenómeno y es que el líquido asciende de dentro del tubo hasta alcanzar una altura *h*, que representa una aparente contradicción con las leyes hidrostáticas. Lo que ocurre es que la tensión superficial, fuerza real actuante por la acción de las moléculas superficiales, representa una presión que equilibra el peso de la columna líquida dentro del tubo. Este detalle debe ser tenido en cuenta al graduar las escalas de los termómetros, pues ellos se construyen con tubos de muy pequeño diámetro interior, o sea con tubos *capilares*.

La superficie libre del líquido dentro de los tubos capilares se llama *menisco*, y el caso de la figura 79 muestra un menisco ascendente, mientras que el de la figura 80 es un menisco descendente; es decir que la calificación se refiere al contacto entre columna líquida capilar y superficie del tubo.

Principio de Arquímedes

El empuje postulado por Pascal actúa también sobre todo cuerpo que se sumerja en un líquido, tendiendo a levantarlo y a hacerlo flotar. A veces flota, otras se sumerge hasta cierta profundidad y otras se va al fondo. Cuándo sucede una cosa o la otra es lo que postula el principio de Arquímedes.

Dice que sobre todo cuerpo sumergido actúa un empuje de abajo hacia arriba de valor igual al peso del líquido desalojado por el cuerpo (figura 81). Es decir que si el cuerpo tiene un volumen

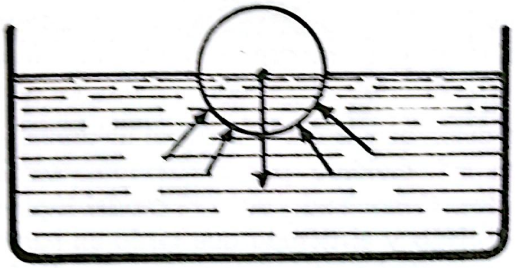


Fig. 81. — El empuje hacia arriba en los cuerpos sumergidos.

V y el líquido un peso específico c, se supone que el volumen del cuerpo está lleno del líquido y ese peso es el valor de la fuerza de empuje.

Así un trozo de madera de unos 2 m^3 de volumen sumergida en agua que pesa 1000 Kg/m^3, experimentará un empuje hacia arriba de:

$$2 \times 1000 = 2000 \text{ Kg}$$

Y ahora surge la pregunta lógica: ¿flotará el cuerpo? Si el peso del cuerpo es mayor que el empuje se irá a fondo, si es igual o menor, el cuerpo flotará más o menos sumergido, ocupando una posición de equilibrio. Así, cuanto más liviano sea el cuerpo menos sumergido quedará pues al estar una parte fuera del líquido, esa parte no desaloja nada y el empuje estará dado sólo por el volumen sumergido.

De modo que en un mismo cuerpo, sumergido en líquidos distintos, se hundirá más o menos según sea el estado de equilibrio entre el peso del líquido que ocuparía la parte sumergida del cuerpo Esto ha dado origen a los *areómetros*, *picnómetros* o *densímetros* (figura 82) que se emplean para medir la densidad o mejor expresado, el *peso específico* de líquidos. Constan de un tubo en cuya parte superior se ha colocado una esferita llena de bolillas metálicas que sirven de contrapeso. El tubo tiene una escala graduada con las densidades referidas al agua. Al sumergirlo en un líquido cualquiera se hunde hasta cierto grado, que se lee en la escala, y que es precisamente la densidad del líquido.

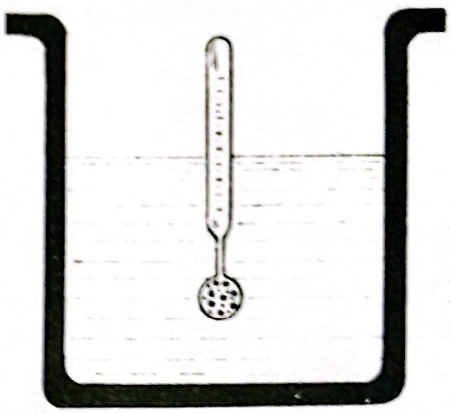


Fig. 82. El densímetro es una aplicación del principio de Arquímedes.

Flotación

El principio de Arquímedes tiene una interesante aplicación en el estudio de la *flotación* de cuerpos que normalmente deben moverse semisumergidos en los líquidos, como es el caso de los barcos. La figura 83 muestra en corte un barco

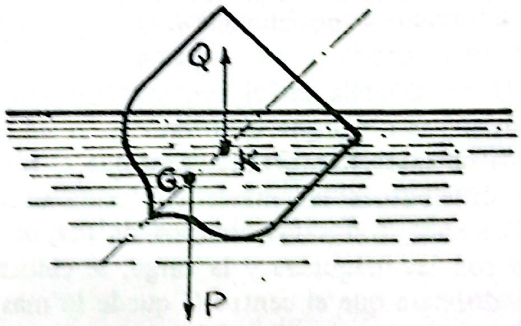


Fig. 83. En la flotación una desviación respecto de la vertical puede o no producir el vuelco.

en flotación, y hemos llamado P al peso del barco, que es una fuerza aplicada al centro de gravedad G del mismo. El empuje hacia arriba es una fuerza Q igual al peso del volumen líquido desalojado, y está aplicada al centro de gravedad K de la masa líquida que queda encerrada por el contorno del barco. Cabe hacer dos aclaraciones: una es que el centro G aparece muy abajo del corte transversal del barco, pero eso lo justificaremos de inmediato. La otra es que dentro del barco no hay líquido, de modo que el que aparece dentro del contorno del mismo es el que hemos llamado líquido desalojado, precisamente por haber entrado la masa del barco en ese líquido.

De acuerdo con el principio de Arquímedes, se cumple la igualdad:

$$P = Q$$

o sea que el peso del sólido es igual al peso del líquido desalojado, o sea el peso de la masa líquida que ocuparía el volumen del sólido que queda sumergido.

Pero, ¿Qué pasa si el barco se inclina con respecto a la vertical que pasa por su centro de gravedad? . Pueden suceder tres cosas, según la posición relativa entre G y K. Si G está más bajo que K, caso ilustrado en la figura 83, se forma una cupla de fuerzas que endereza de inmediato al barco. Si G y K coinciden, el barco queda inclinado, y si G está más alto que K, caso ilustrado en la figura 84, el barco vuelca. Aclaremos

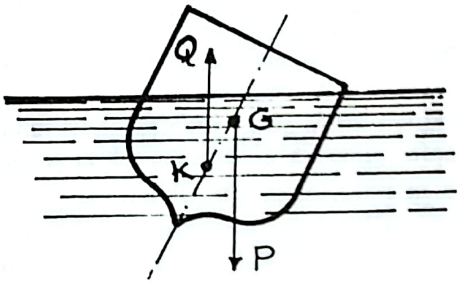


Fig. 84. – Caso en que se produce el vuelco por estar G más alto que K.

que G no se halla en el centro geométrico del corte del barco porque el mismo no es un sólido macizo de masa homogenea, sino que es hueco y tiene distribuídas las masas en forma irregular. Precisamente, todos los cuerpos de mayor peso, como son las máquinas y la carga, se colocan en el fondo, para que el centro G quede lo mas bajo posible y el barco tenga *estabilidad,* según el caso de la figura 83.

Hidrodinámica - Caudal

Los líquidos en movimiento están sujetos a leyes que se estudian en la parte de la Hidráulica llamada Hidrodinámica. Y así como en el estudio de los cuerpos en movimiento definimos como primer concepto fundamental el de *velocidad,* así en esta oportunidad nos ocuparemos de la misma. Velocidad es la relación entre un espacio recorrido y un tiempo empleado en recorrerlo, pero en Hidráulica, es un poco molesto recurrir a esa definición. Se prefiere generalmente partir de otro lado.

Una corriente líquida lleva consigo el transporte de una gran masa líquida de un lado hacia otro. Se puede apreciar el volumen de esa masa, tomarlo en metros cúbicos, como a cualquier otro volumen, y medir el tiempo que ha tardado en circular. De ello surge un importante concepto: el de gasto y caudal, que se definen así:

Se llama *caudal* a la cantidad total de líquido que ha circulado en un tiempo dado.

Se llama *gasto* de una corriente líquida a la cantidad de líquido que circula en la unidad de tiempo. Así, si se tiene que un río lleva 100.000 m^3 de agua de un lugar a otro en el término de 1/3 (20") de minuto, el gasto de agua se mide así:

$$q = \frac{Q}{t} = \frac{100.000}{20''} = 5.000 \text{ m}^3/\text{s}$$

Es decir que el gasto es igual al caudal, tomado en m^3 dividido por el tiempo, tomado en segundos. Conociendo pues el caudal líquido que ha circulado y el tiempo que tardó en hacerlo, se determina fácilmente el gasto líquido. De la definición de gasto surge otra, no menos importante, y es la de *velocidad,* que adquiere así un nuevo concepto que el dado para los sólidos.

Velocidad

Supongamos que la corriente líquida circula por una tubería, un canal o conducto de cualquier forma, pero cuya sección transversal llena, es decir que la superficie transversal que contiene líquido se puede medir y vale S m^2. El gasto lo hemos definido con la letra q (m^3/s). La velocidad de la corriente líquida es igual al cociente entre el gasto y la sección transversal:

$$v = \frac{q}{S}$$

Y resulta dada en m/seg de acuerdo con las unidades de los dos elementos que intervienen en la relación.

De manera pues que si una tubería conduce agua, a razón de 100 metros cúbicos por segundo, y la sección transversal de esa tubería supuesta totalmente llena de agua es de 0,5 m^2, la velocidad del líquido puede estimarse en:

$$\frac{100}{0,5} = 200 \text{ m/s}$$

en unos 200 metros por segundo. De modo que ya contamos con dos elementos fundamentales de la Hidrodinámica: gasto y velocidad, que unidos al concepto de presión de la Hidrostática.

forman el trío que interviene en el estudio de todas las máquinas hidráulicas.

Derrame por orificios

Sea un depósito como el que se ve en la figura 85, con un orificio en la parte inferior de una de las paredes. Tal orificio tiene una sección transversal S, dada en m^2. Por efecto de la gravedad, el agua sale por el orificio con una cierta velocidad que según Torricelli vale:

$$v = \sqrt{2 g h}$$

Donde g es el valor de la aceleración de la gravedad, que puede suponerse de un valor más o menos constante en una región determinada de la tierra; tomando g: 9,81 y simplificando, resulta que la velocidad vale:

$$v = 4{,}43 \sqrt{h}$$

Es decir una constante multiplicada por la raíz cuadrada de la altura líquida o *tirante* que carga

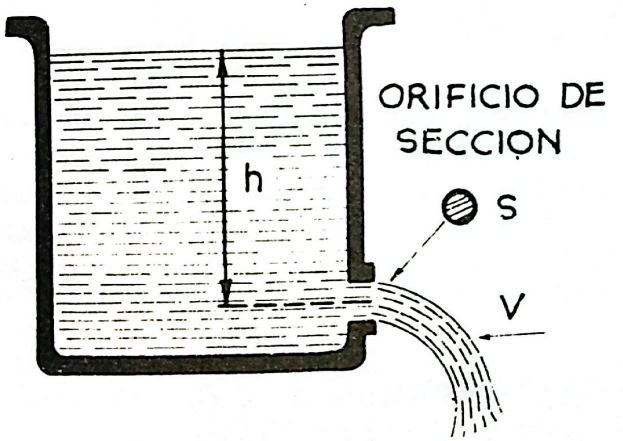


Fig. 85. – Derrame de líquidos por orificios.

sobre el centro del agujero, según se indica en la figura.

El gasto de agua, o sea la cantidad de líquido que sale por segundo del orificio, se halla multiplicando la velocidad por la sección transversal:

$$q = S v$$

Pero hay que hacer una aclaración: hemos supuesto que la vena líquida era cilíndrica, de filetes paralelos, y en la realidad no ocurre así, sino que se produce una contracción, según se ve en la figura 86. La sección neta resulta disminuída, y debe tomarse en su lugar la sección reducida o contraída, que es bastante menor (la sección contraída suele ser un 40 % menor que la total).

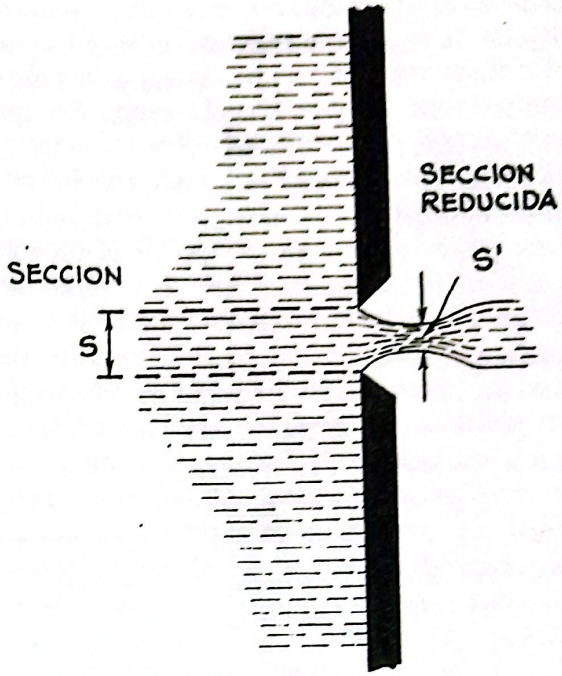


Fig. 86. – La vena líquida sufre una contracción al salir por el orificio.

Medición de la velocidad

En una corriente líquida a cielo abierto se puede medir fácilmente la velocidad mediante el tubo de Pitot (ver figura 87). Se sumerge parcialmente un tubo acodado y se observa que en él el agua sube hasta cierta altura Z sobre la superficie de la corriente. De acuerdo con el principio de Torricelli se deduce que si ahí el agua tiene esa velocidad, es como si actuara una carga líquida de altura Z, de modo que se puede aplicar su fórmula:

$$v = 4{,}43 \sqrt{Z}$$

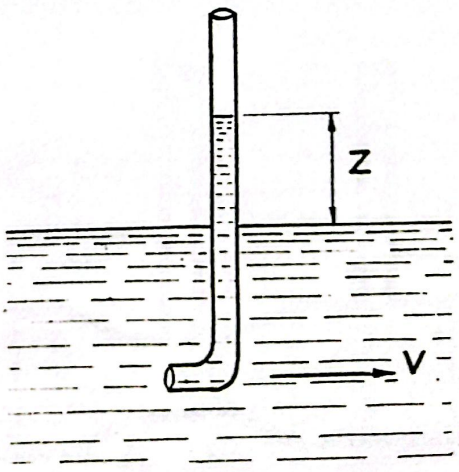


Fig. 87. – El tubo de Pitot para medir la velocidad de la corriente líquida.

Tomándose Z en metros para que la velocidad resulte en m/seg. En la práctica no se puede aplicar directamente la fórmula vista, por los errores que introducen las pérdidas de carga. Se aplica un coeficiente de corrección que se determina por tarado, aplicando el tubo en corrientes de velocidad conocida.

Para actuar con el aparato, se puede deducir el valor del gasto, que está dado por una expresión como la siguiente:

$$q = A\sqrt{H}$$

Y en la que A es una constante propia del aparato, dada en función de las secciones mayor y menor de la cañería y de los conos, que por ser algo compleja de calcular, pues debe contemplar los efectos de la reducción de volocidad y de la pérdida de carga, la fábrica la da por cada contador. A es, entonces, un número dado por la fábrica.

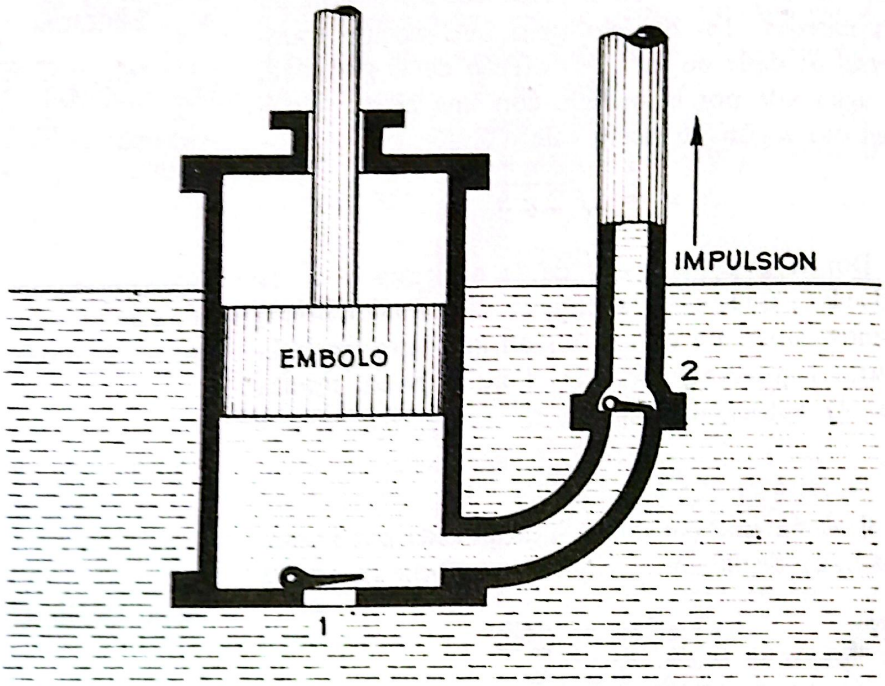


Fig. 89. – Principio de la bomba de émbolo del tipo impelente.

Medición del gasto

Hay varios dispositivos que permiten medir el gasto líquido directamente, aunque sabemos que bastaría multiplicar la velocidad por la sección de pasaje. Para tuberías resulta más cómodo acoplar el *contador Venturi*, cuyo esquema se ve en la figura 88. Consta de dos troncos de cono en cuya parte central hay un tubito vertical para leer el nivel hidráulico. En la parte de mayor diámetro hay otro tubito, donde también se puede leer el nivel.

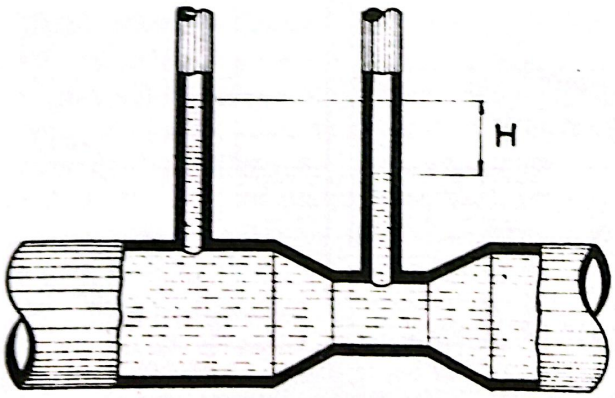


Fig. 88. – El contador Venturi para medir el gasto de líquido.

Bombas de émbolo

Las bombas son los aparatos hidráulicos más simples y de mayor difusión, por sus variadas aplicaciones. Para usos generales, donde no se requiera un régimen severo y un rendimiento extraordinario, se emplean las bombas de émbolo de varios tipos. Son bien conocidos los principios de estas bombas, que se clasificaron a veces en tres grupos: aspirantes, impelentes y mixtas. En realidad, siempre una bomba es aspirante e impelente, sólo que varían las condiciones en que se realiza una u otra función.

Veamos, por ejemplo, la figura 89, que muestra un corte esquemático de una bomba de las llamadas impelentes. El cuerpo de la bomba debe estar sumergido en el líquido para que en el ascenso del émbolo se llene, porque la válvula inferior se abre por simple presión que recibe del líquido exterior. En el movimiento del descenso

el émbolo comprime el líquido, que cierra la válvula 1 y abre la 2, realizándose la impulsión por la cañería. Es evidente que la aspiración en este caso no se puede presentar como una operación neta, pues se realiza automáticamente porque el líquido, en el exterior de la bomba, ejerce presión sobre la válvula y entra al cilindro.

Salvo casos como el presente, siempre se considera en las bombas las dos operaciones: impulsión y aspiración. La figura 90 muestra un corte

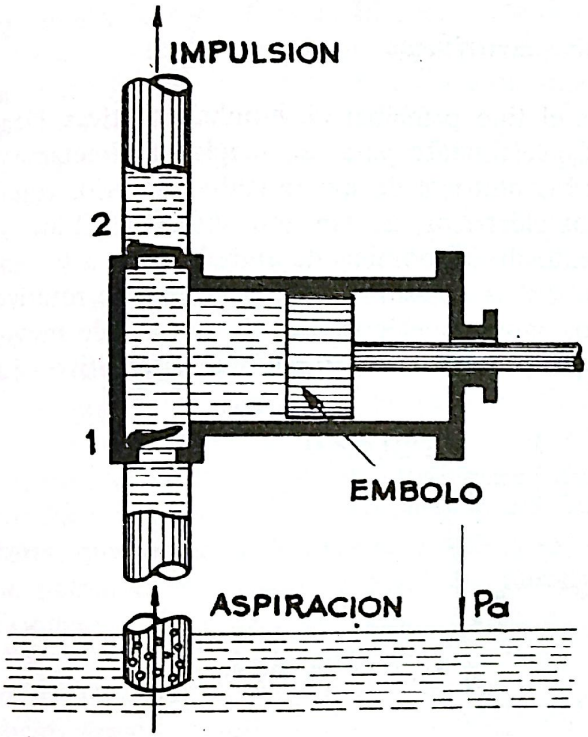


Fig. 90. – Bomba de émbolo del tipo aspirante-impelente.

de una bomba típica, con sus dos válvulas, la 1 de aspiración y la 2 de impulsión. Cuando el émbolo camina hacia la derecha, la válvula 1 se abre por succión y la 2 se cierra. El líquido es aspirado llenándose el cuerpo de bomba o cilindro. Cuando el émbolo va hacia la izquierda, se cierra la válvula 1 por compresión, y se abre la 2 por empuje, de modo que el líquido es impulsado hacia arriba por la cañería.

La aspiración se realiza gracias a la aplicación del principio de Torricelli, pues sobre la masa líquida del depósito o del subsuelo actúa la presión atmosférica. Haciendo el vacío en la parte superior de la tubería de aspiración, el líquido se elevará hasta una altura dada por su densidad, que para el agua sabemos es de unos 10 m. Pero el vacío en el cuerpo de la bomba no es perfecto, y en las cañerías hay pérdida de carga, de modo que la altura máxima de aspiración se limita a 8, o a lo sumo a 7 metros. El cuerpo de bomba debe estar ubicado, por este motivo, en un punto intermedio de la cañería, constituyendo toda la que queda arriba de él, la cañería de impulsión. En efecto, cuando la altura de elevación del líquido es mayor de 7 a 8 metros, se coloca el cuerpo de bomba a esa distancia del nivel líquido inferior y encima del mismo se pone la tubería de impulsión. Si la altura total de elevación es menor de 7 metros, se puede suprimir la tubería de aspiración, como el caso de la figura 89 colocando la bomba sumergida y volcando simplemente el agua por un orificio del costado del cilindro.

Prensa hidráulica

Es una aplicación inmediata de las bombas de émbolo y del principio de Pascal. En la figura 91 se puede ver un corte esquemático. Consta de dos cuerpos de bomba de muy diferentes secciones transversales: el cilindro motor de reducida sección *s* y el resistente, de gran sección *S*. El cilindro pequeño tiene un émbolo accionado a mano mediante una palanca, que, por el momento, supondremos de relación de brazos unitaria, es decir que el brazo de la potencia es igual al de

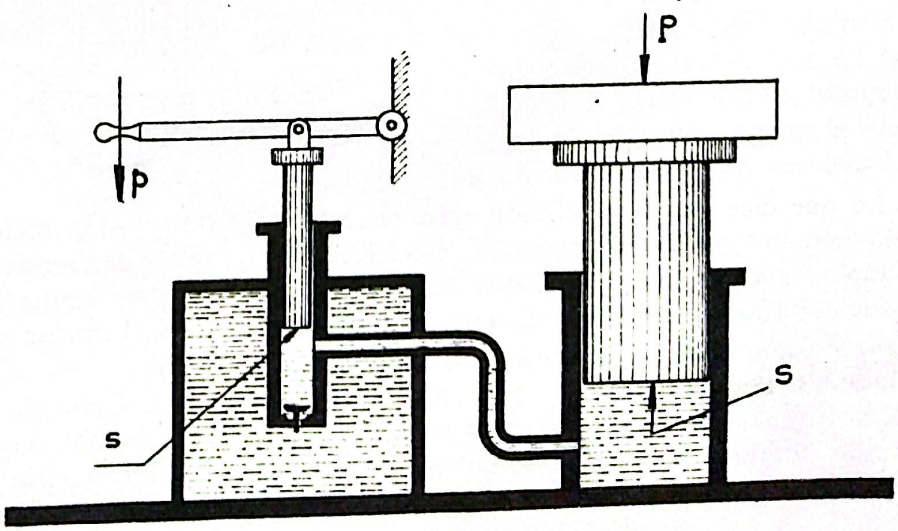


Fig. 91. – Principio de acción de la prensa hidráulica.

la resistencia, cosa que no es exacta con el tipo de palanca ilustrado en la figura.

Sobre la gran placa que apoya en el émbolo mayor se carga un peso P mucho mayor que el esfuerzo p que se hace en la bomba chica. De acuerdo con el principio de Pascal, la presión ejercida en cualquier punto de la masa líquida se transmite en todas direcciones con igual intensidad, de manera que supongamos que sobre el émbolo chico se ejerce una fuerza p, con lo cual la presión ejercida será:

$$\frac{p}{s}$$

Y esta misma presión debe actuar sobre el émbolo grande, de modo que multiplicando esa presión por la superficie S se tiene la fuerza total que actúa en el émbolo mayor, que puede ser igual al peso colocado encima:

$$P = \frac{S\,p}{s}$$

Lo que dice que si la relación entre la sección del émbolo grande al pequeño es 100, por ejemplo, la carga que se coloque sobre la placa puede ser 100 veces más grande que el esfuerzo a realizar sobre el émbolo chico, y así para otras relaciones. Pero todavía hay que agregar que la palanca que actúa sobre la bomba permite disponer de una relación favorable, de modo que se tiene, en realidad, que con un esfuerzo de 1 Kg en la bomba, se pueden levantar pesos de varios cientos de Kg.

Una aplicación inmediata de estas prensas es la de levantar pesos (estaciones de servicio para automóviles), comprimir o ejercer presiones elevadas (prensas para estampar), etc. No siempre se accionan a mano, pues resulta más cómodo ejercer la pequeña presión sobre el émbolo menor con ayuda de un motorcito, un pequeño compresor u otro dispositivo.

Bombas centrífugas

Es el tipo principal de bombas rotativas, ideadas especialmente para ser acopladas directamente a los motores de movimiento giratorio, como ser los eléctricos, de tan gran difusión. El inconveniente de las bombas de émbolo, pese a su sencillez, era la transmisión del movimiento rotativo de los motores eléctricos a la bomba de movimiento de vaivén o rectilíneo alternativo. La transmisión incluye un mecanismo de biela manivela, de rendimiento no muy bueno. En las bombas centrífugas se elimina el inconveniente, pues el motor se acopla directamente al eje de la bomba.

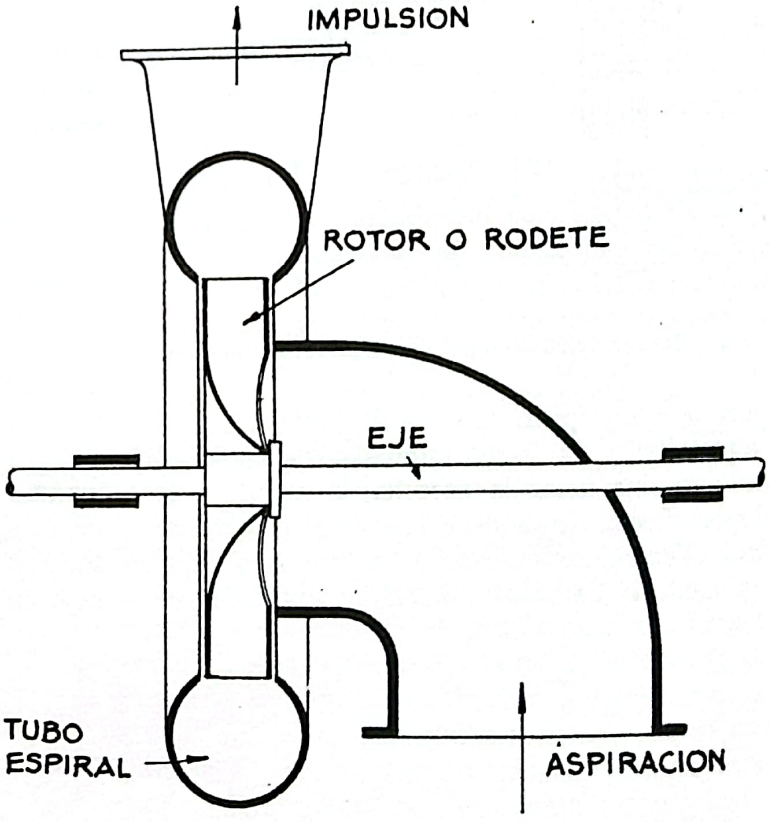


Fig. 92. – Corte esquemático de una bomba centrífuga.

La figura 92 muestra un corte esquemático de una bomba centrífuga, así llamada porque su funcionamiento se basa en el efecto de la fuerza centrífuga sobre el líquido a elevar. Para tal fin

se imprime al mismo una gran velocidad de giro, con lo que será impulsado hacia afuera y conducido por paletas de forma especial, ascendiendo finalmente por la tubería de impulsión. Distinguimos sus partes fundamentales que son: el tubo de aspiración, el de impulsión, el rodete o rueda móvil y el tubo espiral que envuelve al rodete.

Generalmente hay en el rodete o rotor de 6 a 12 paletas, curvadas o alabeadas en forma especial a fin de ofrecer un mínimo de resistencia a la circulación del líquido, y su curvatura es suave para impulsarlo con eficacia. El agua pasa de las paletas a la tubería espiral que envuelve el rotor, y por ella sigue hasta llegar a la tubería de impulsión, por donde asciende al depósito.

Se comprende rápidamente que si la rueda gira sin estar llena de agua, la bomba no comenzará a funcionar, de modo que si la centrífuga trabaja sumergida, no se presentará inconveniente alguno, pero en caso contrario, hay que llenarla de agua, operación que se llama *cebado*. Generalmente en la parte superior del tubo espiral hay un orificio con un grifo para echar el agua para el cebado, pero hay que tener en cuenta que si se echa agua, ésta se escurrirá por la tubería de aspiración. Para impedirlo, hay una válvula en dicha tubería, que se cierra durante el cebado y que se abre nuevamente cuando la bomba comienza a funcionar.

La primer diferencia que se nota con las bombas centrífugas, al compararlas con las de émbolo, aparte de su movimiento giratorio, es que la columna líquida fluye continuamente, y no en forma intermitente como en las de émbolo, en las cuales había una embolada por cada dos carreras del pistón. En estas bombas no hay interrupción del chorro de agua hasta que se detenga la marcha.

La altura máxima de aspiración está limitada, por las mismas razones que se dieron para otras bombas, a unos 7 a 8 metros.

Ruedas hidráulicas

La utilización de la energía hidráulica para mover máquinas y en especial para accionar generadores eléctricos de usinas, es muy antigua y actualmente sólo han variado levemente las características de las máquinas empleadas, pero no el método. Las ruedas hidráulicas precedieron a las turbinas modernas, pero pese a ello, en los casos de muy pequeño caudal, o donde hay muy poca energía disponible, la rueda cumple satisfactoriamente su cometido y hasta puede asegurarse que más eficazmente que las turbinas. Las modernas máquinas hidráulicas están diseñadas para rendimiento máximo a régimen constante, y las ruedas hidráulicas en cambio, si bien no llegan a esas cifras de rendimiento, lo tienen bueno para regímenes variables.

Las ruedas hidráulicas pueden ser de corriente superior o inferior, habiendo tipos intermedios cuyo punto de ataque está más cerca de la parte de abajo o de la de arriba, tomando entonces el nombre de una de las dos categorías mencionadas. La figura 93 representa una rueda de co-

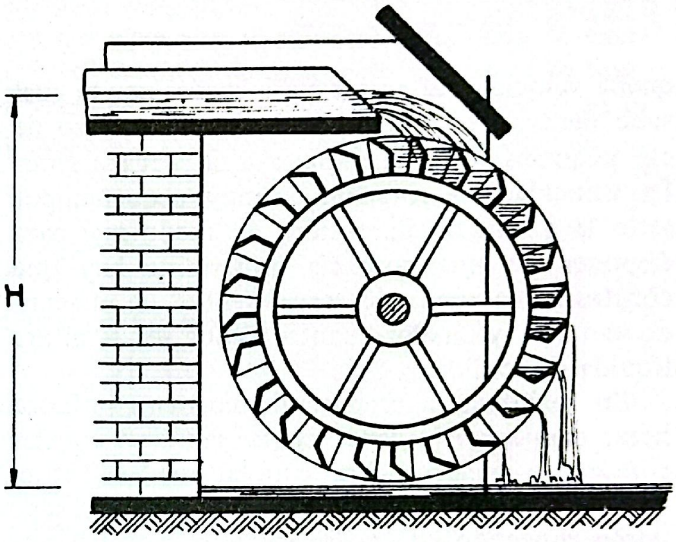


Fig. 93. – Corte esquemático de una rueda hidráulica de corriente superior.

rriente superior, que puede instalarse donde hay un pequeño salto de agua, disponiéndose para aprovechar su energía de una altura manométrica *H*, indicada en la figura.

La rueda en sí está formada por dos discos, entre los cuales hay una serie de palas o *cangilones* que se llenan de agua hasta donde lo permite su borde. Por efecto del peso de los cangilones llenos la rueda comienza a girar. En todas partes reina la presión atmosférica, de manera que la única razón del movimiento es el peso de las palas llenas de líquido. Por tal motivo a las ruedas hidráulicas se las llama también *motores de peso.*

Un detalle a tener en cuenta es que no se debe permitir el llenado de los cangilones, porque se derramaría el agua al comenzar a girar la rueda. Se recomienda como buena cifra un llenado de 30 % a 50 %.

Las ruedas de corriente superior neta se emplean cuando se dispone de un salto o de una altura de agua de 4 a 8 metros. Para alturas menores resultaría la rueda muy pequeña y se prefiere tomar el agua por el costado, o aun por debajo, según se ve en la figura 94. Es lo que definimos como una rueda de corriente inferior. Se puede notar que el agua experimenta una pe-

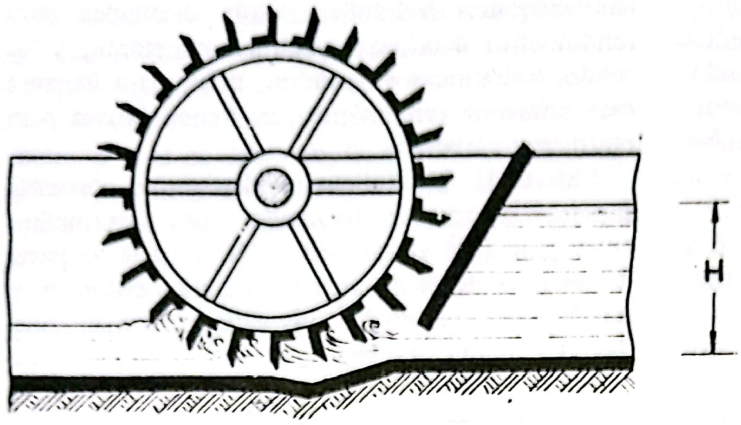


Fig. 94. – Principio de acción de la rueda hidráulica de corriente inferior.

queña velocidad al entrar en la rueda, por lo cual sube dentro de las palas un poco, y el peso de esa pequeña columna impulsa a la rueda a girar. La velocidad de rotación es muy pequeña, por serlo la altura de impulsión, de modo que para disponer de una potencia importante hay que construir una rueda de gran longitud en el sentido del eje, y mayor cuanto menor sea la altura líquida disponible.

En realidad, las ruedas de corriente inferior neta, comienzan a tener cierta similitud con las turbinas o mejor dicho, con las ruedas Pelton, que veremos enseguida, porque el agua actúa ya como chocando contra las palas. Hay una verdadera transición entre la acción del peso del agua y de su velocidad, que no está bien definida si el punto de ataque no se encuentra bien abajo de la rueda. La ilustración de la figura es en realidad, una rueda que trabaja a choque. El rendimiento de estas máquinas es generalmente menor de 35 %. Usando palas curvas en lugar de rectas, y cuyas curvas estén estudiadas de manera de aprovechar la velocidad y dirección del chorro de agua, se mejora el rendimiento. Tal rueda es la Poncelet, precursora de las turbinas modernas, y que alcanza un rendimiento del 70 % que es muy alto.

Ruedas Pelton

Son, en realidad, una mezcla de rueda y turbina, porque están dotadas de paletas curvas. Se emplean para grandes alturas de agua disponibles, en cuyos casos se trae el líquido por tuberías y se hace desembocar por un eyector (ver figura 95). La fuerza del chorro actúa sobre las paletas y hace girar a la rueda con bastante velocidad. El principio de funcionamiento es pues de acción, es decir que interviene únicamente el efecto de gol-

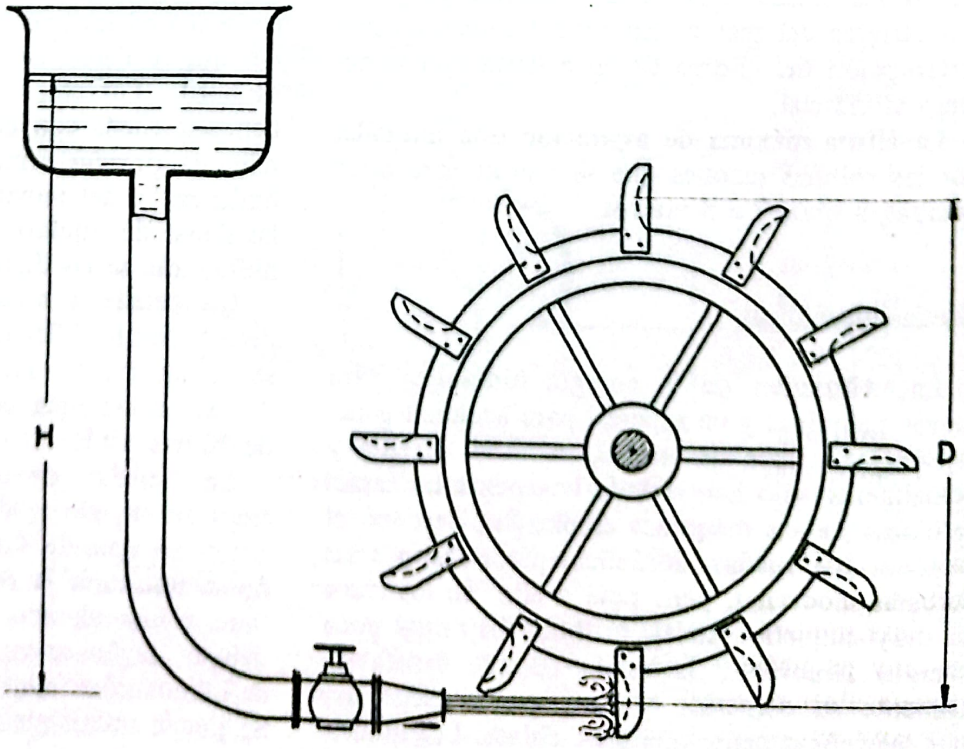


Fig. 95. – Principio de la rueda Pelton.

pe de agua sobre la pala y no el peso o la velocidad de la misma.

Se emplea cuando se dispone de caídas de agua comprendidas entre 200 y 1.600 metros, porque ninguna otra máquina hidráulica la supera en rendimiento para esas alturas, llegándose a una eficiencia de 90 % o más aun.

Turbinas hidráulicas

Son el resultado de un prolijo estudio entre los efectos del peso del agua, de la velocidad de un chorro y de la presión de choque. Ya hemos visto que el primer efecto se emplea en las ruedas de ataque superior y el segundo en las de ataque inferior, especialmente en los casos de alturas disponibles de agua intermedias, ni muy grandes ni demasiado pequeñas. Desde los 40 metros de carga líquida comienza a usarse la rueda Pelton, de manera que para menores alturas disponibles habrá que emplear algunos de los tipos de turbinas, y los hay para cada caso, según sea el caudal y la carga. Entendemos siempre por carga o altura líquida la distancia entre el nivel del agua en la parte superior, depósito o embalse y el nivel en la descarga, después de salir de la rueda o turbina. Hasta aquí hemos indicado esa altura de carga en las figuras referentes a ruedas hidráulicas.

Turbina Francis

Una turbina consta, esencialmente, de tres partes: el distribuidor, la rueda y la descarga. La figura 96 muestra un corte esquemático de una Francis y pueden verse las distintas partes componentes.

El distribuidor está formado por una corona de paletas que se pueden mover a voluntad a los efectos de graduar la cantidad de líquido. La rueda está compuesta por una cantidad de paletas alabeadas de forma tal, que permiten la circulación del agua con el mínimo de pérdida de energía y el máximo de aprovechamiento de su fuerza viva. El tubo de succión o de descarga es el que conduce el agua hasta su salida al exterior.

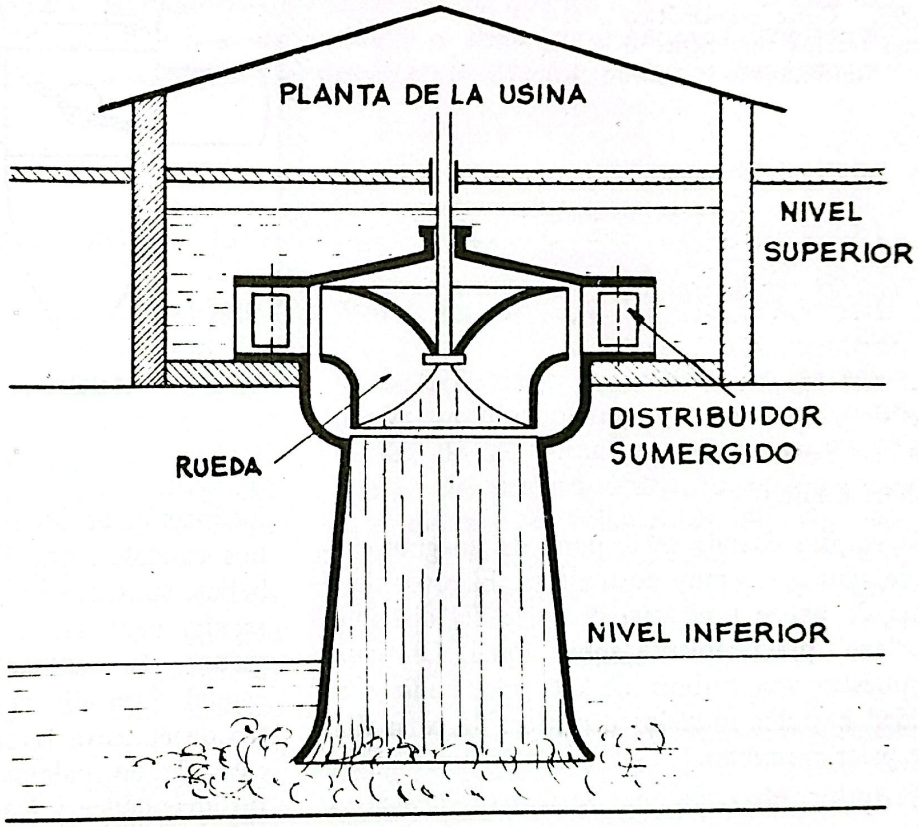


Fig. 96. -- Corte esquemático de una turbina hidráulica tipo Francis.

Toda la técnica de la construcción de turbinas está dirigida hacia la forma de las paletas de la rueda, pues de ello depende, absolutamente, el rendimiento. Afectan formas alabeadas y curvadas a la vez, ofreciendo una verdadera superficie de deslizamiento al agua que sale del distribuidor y entra en ellas. Al pasar, el líquido actúa por reacción, debido a que el chorro es desviado de su dirección primitiva, obligando a girar a la rueda.

Según sea la carga de agua disponible, se construyen tres tipos de turbinas Francis, llamadas

rápida, normal y *lenta*. Todavía hay un modelo *express*. La razón es que cuando menor es la carga líquida, para tener una velocidad de rotación conveniente para accionar generadores eléctricos, hay que diseñar la rueda de manera especial. Así, para grandes alturas se emplea la Francis lenta, y para muy poca carga líquida hay que pasar a la rápida o aun a la express.

rresponde a la ilustración. El rotor semeja la hé ce de un barco y tiene generalmente cuatro pala Por poca que sea la velocidad de caída del agua se obtiene un aprovechamiento máximo de energía, donde otros tipos de turbinas fallarían La turbina hélice se construye para trabajar a r gimen constante.

Si el régimen líquido es variable, resulta que

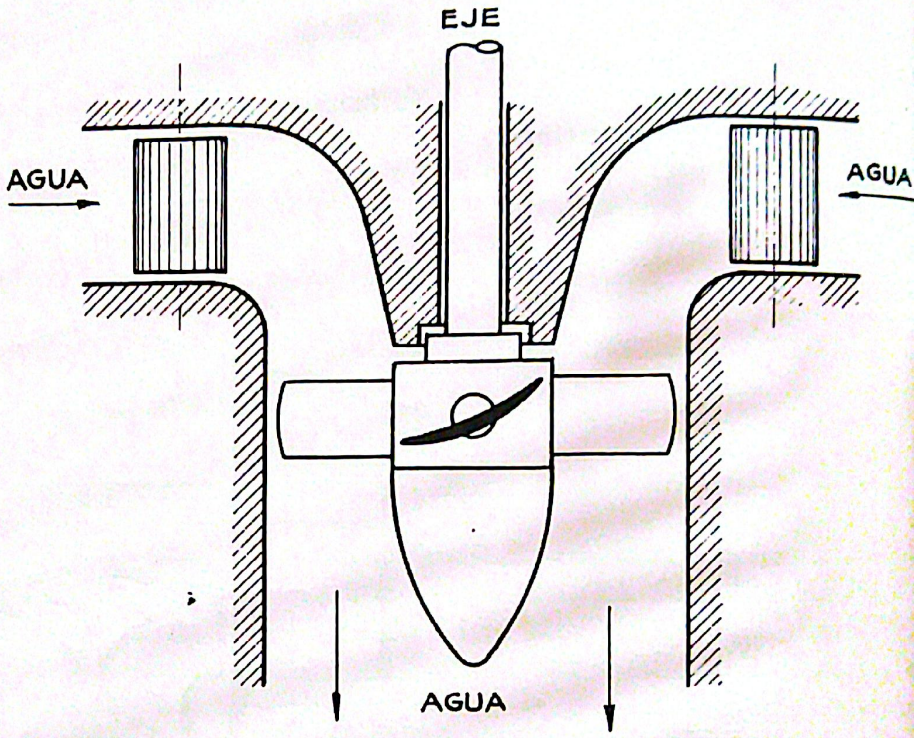


Fig. 97. – Corte esquemático de una turbina tipo hélice o tipo Kaplan.

Turbina Kaplan

Se emplea cuando se dispone de un gran caudal de agua, pero muy poca altura. El rotor tiene forma de hélice y el agua que sale del distribuidor "cae" prácticamente sobre aquél. La figura 97 muestra una turbina de ese tipo, aunque en realidad hay dos modelos distintos: de palas fijas y de palas ajustables.

La turbina de palas fijas se llama *hélice* y co-

inclinación de las palas no es correcta para alg nos caudales, por lo que se modifico la turbi hélice, substituyéndola por la *Kaplan*, que es p recida, pero las palas pueden ser movidas pa graduar la inclinación más conveniente a cad caudal. Para ello el eje del rotor es hueco, y de tro de él corre la barra de regulación de inclin ción de las paletas. En los demas detalles, l turbinas hélice y Kaplan son idénticas.

Día 9

Al comenzar la jornada anterior mencionamos los líquidos y los gases y dejamos sentado que dedicaríamos este capítulo que ahora comienza al estudio de los gases, su reposo y su movimiento. La primera cuestión que hay que plantear es que los sólidos y los líquidos son visibles mientras que los gases son muchas veces invisibles y eso dificulta la apreciación de los fenómenos. Pero tenemos que irnos acostumbrando a esa dificultad, pues otros agentes físicos tampoco son visibles, como el calor, el magnetismo y la electricidad. El hombre ha encontrado la manera de evaluar los fenómenos sin ver al agente que los produce, utilizando aparatos de comprobación. Ese es el caso de los gases, que requieren de indicadores en mayor medida que los líquidos y en mucho mayor grado que los sólidos. Ya tenemos entonces el tema que deberemos abordar en esta oportunidad y, con la advertencia que formulamos al lector, podemos dar comienzo a la tarea.

ESTUDIO DE LOS GASES – NEUMATICA

Tal como ocurrió cuando llamamos Hidráulica al estudio de los líquidos, dando la impresión que solo trataríamos sobre el agua, ahora denominamos Neumática al estudio de los gases, como si solamente existiera el aire como gas; la justificación es la misma, ya que el aire es el gas que más abunda y el que se presenta en los fenómenos físicos sin que lo busquemos.

Otra aclaración necesaria es que en el capítulo anterior se tocaron temas que podrían haber sido dejados para este capítulo, como el principio de Torricelli y todos los dispositivos donde actuaba la presión atmosférica; en ellos actúan líquidos, pero la acción sobre ellos la ocasiona un gas. Esta superposición es frecuente en la Física y cualquiera que sea el ordenamiento que se adopte siempre podrá ser objetado o aprobado.

Para estudiar el comportamiento de los gases debemos recordar su propiedad física básica descripta en el capítulo primero. Así podemos mencionar la gran movilidad de sus moléculas que originan una *fuerza expansiva* notable, que los hace tratar de ocupar el mayor espacio posible. Simples experiencias familiares comprueban esta aseveración, pues abriendo una llave de gas muy rápidamente se percibe su olor en toda la habitación, debido a la rápida expansión del mismo. Los perfumes son evaporables y destapando un frasco esos vapores se expanden con rapidez debido a la razón antedicha.

Peso de un gas

La extrema expansibilidad de los gases hace perder sentido práctico a la medición o determinación de su volumen, pues el mismo coincide con el del recinto donde se encuentran; en el caso del aire el volumen es un concepto vago, pues podría hablarse del volumen de una porción de aire. Por eso se prefiere calificar al gas por su peso y para mejorar la referencia, por su *peso específico.*

Pero como los gases se comprimen o se expanden con facilidad, habrá que especificar que, si se toma un volumen unitario como el metro cúbico para determinar el peso específico de un gas, se fijará la condición de compresión o expansión que reine en ese volumen. Resulta cómodo suponer al gas en estado libre como está el aire en la atmósfera, donde reina la presión que tiene por valor la cifra que se llama precisamente presión atmosférica. Si recordamos el aparatito de Torricelli (figura 76), la presión atmosférica era capaz de sostener una columna de mercurio de 760 mm de altura; bien, esa es la presión que adoptamos como normal para medir el peso de un gas.

También hay que recordar que si se calienta un cuerpo aumenta la actividad molecular y con ello la presión que el gas ejerce sobre el recinto que lo contiene; esta mención la hacemos breve-

mente porque este tema corresponde al capítulo próximo y sería otra superposición a que nos obliga la Física. Lo esencial es que debe adoptarse una temperatura básica para el gas y se toma la de 0°C, temperatura del hielo.

Ahora podemos definir el peso específico de un gas, diciendo que es el peso en Kg que tiene un volumen de gas de 1 m^3, sometido a la presión atmosférica normal de 760 mm de mercurio y estando a la temperatura de 0°C. Es evidente que esta manera de determinar el peso específico adopta el mismo que se usaba para los sólidos y los líquidos, tomando al agua como referencia. Otro criterio prefiere tomar como referencia al aire, y entonces se habla de peso específico *normal*; si recordamos que numéricamente había coincidencia entre el peso específico y la densidad en los sólidos homogéneos y en todos los líquidos, puede aplicarse esa coincidencia a los gases y hablar de densidad del gas referida al aire, o sea comparando el peso de un gas con el del aire en idénticas condiciones de presión y temperatura.

Por las razones expuestas, las tablas que dan el peso específico o densidad de los gases suelen tener dos columnas, una referida al agua y otra referida al aire. A título ilustrativo damos una tabla con los datos para algunos gases conocidos.

Peso específico de algunos gases

Gas	Agua = 1000	Aire = 1
Aire	1,293	1
Anhídrido carbónico	1,977	1,53
Oxígeno	1,429	1,106
Nitrógeno	1,251	0,97
Gas de alumbrado	0,569	0,44

Aclaración: Se ha tomado para el agua 1000 en vez de 1 para que los pesos de los gases resulten directamente en la cifra de Kg/m^3.

Presión atmosférica

El globo terráqueo está rodeado de una enorme masa de gas compuesto por una mezcla de varios gases primarios, entre los que preponderan por sus grandes proporciones el nitrógeno (79 %) y el oxígeno (21 %); otros gases son el helio, el argón, el neón, etc., cuyas proporciones son tan pequeñas que en las cifras dadas antes no se los ha tenido en cuenta, pues la suma de 21 % y 79 % da el total de 100 %. Ese enorme océano de gas puede suponerse formado por capas (figura 98) cada una de las cuales tiene su peso, determinado por la atracción que la Tierra ejerce sobre la masa gaseosa. Cada capa presiona sobre la inferior y así se va formando un peso acumulado, el cual, si se lo divide por la superficie de la esfera terráquea, da una *presión*, según el concepto visto en el capítulo anterior. Luego, la atmósfera ejerce sobre la Tierra una presión, la cual depende de la altura del punto que se considere.

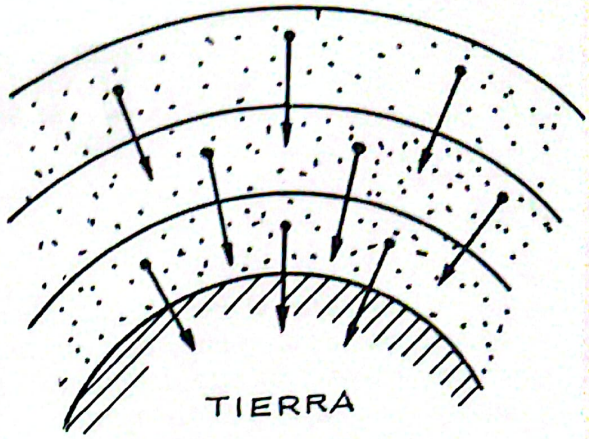


Fig. 98. – La presión atmosférica se debe al peso de las capas gaseosas que forman la atmósfera.

Tal presión se llama *atmosférica* y al nivel del mar su valor es de 1,033 Kg/cm^2. Para obtener la columna equivalente de agua imaginemos un prisma de un cm^2 de base (figura 99); cada cm de alto pesa un gramo, si es agua, y para formar un peso de 1,033 Kg deberemos dar al prisma una altura de 1033 cm, o sea 10,33 m. De aquí sale que la presión atmosférica equilibra a una columna de agua de aproximadamente 10 metros de altura (figura 76). Si en lugar de agua tenemos mercurio, como el peso específico del mismo es

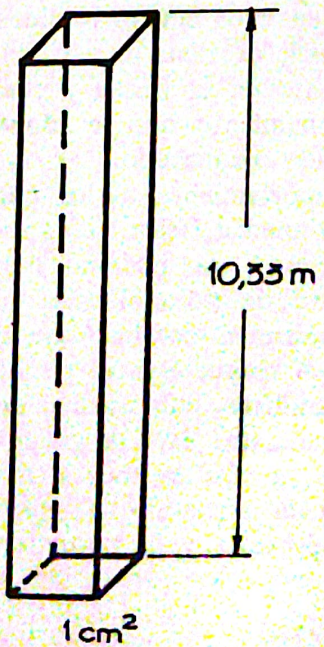


Fig. 99. – La columna de agua de 10,33 m equilibra a la presión atmosférica.

13,6 Kg/litro, tenemos que dividir la altura de 10,33 por 13,6 y nos da 0,76 m. Esta es la altura de una columna de mercurio que equilibra a la presión atmosférica normal, o sea el nivel del mar.

¿Es constante la presión atmosférica a un nivel determinado? —No, pues hay varios factores que la hacen variar. Los vientos proveen fuerzas que tienen componentes verticales en ascenso o en descenso, y que se restan o se suman al peso de la atmósfera; la evaporación del agua terrestre forma un vapor que se mezcla con el aire, alterando su densidad y por ende el peso de la atmósfera. Citamos las dos causas principales, pero hay otras; lo esencial es que la presión atmosférica varía y por tal motivo se ha presentado la necesidad de medirla, cosa que se hace con aparatos llamados barómetros.

El barómetro

Primero aclararemos el origen del nombre del aparato. En Física teórica se usa para la fuerza una unidad que se llama *dina* y que resulta 9,81 veces menor que el gramo. En esa misma teoría, la unidad de presión, que es la dina/cm^2 toma el nombre de *bar*; resulta entonces que la presión puede medirse en *bar* y el aparato que mide la presión recibió el nombre de *barómetro*. Para nuestro estudio hemos usado unidades prácticas y medimos la presión en Kg/m^2 ó Kg/cm^2, y no en *bar*, pero queríamos justificar el nombre que se da al aparato que vamos a describir.

El principio de Torricelli nos da la idea básica para hacer un barómetro como el ilustrado en la figura 100. Tomamos un tubo de vidrio, lo llenamos de mercurio y tapando por un momento el extremo inferior lo introducimos en una cubeta con mercurio. La presión atmosférica actúa sobre la superficie libre en la cubeta y sostendrá una columna de mercurio del tubo, cuya altura dependerá del valor de esa presión en esa altitud y con las condiciones que reinen en ese momento en el aire ambiente. Junto al tubo ponemos una escala graduada en mm y sabemos que al nivel del mar y con atmósfera normal, la columna tendrá 760 mm de alto. Recuérdese que la escala deberá ser adecuada al fenómeno de capilaridad, figura 80, que conocemos. Esa escala no necesita tener graduaciones con grandes límites, pues en la práctica no se tienen variaciones que excedan las comprendidas entre 700 y 800 mm.

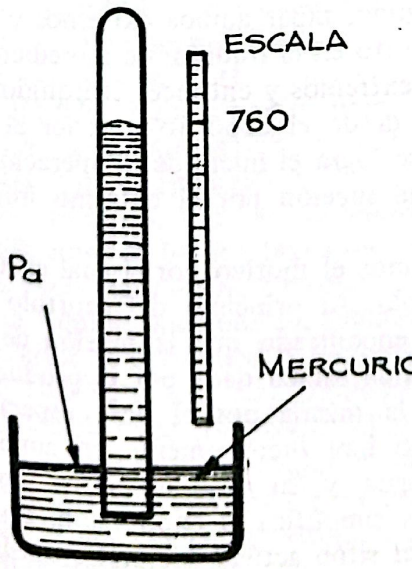


Fig. 100. Disposición esquemática del barómetro de mercurio.

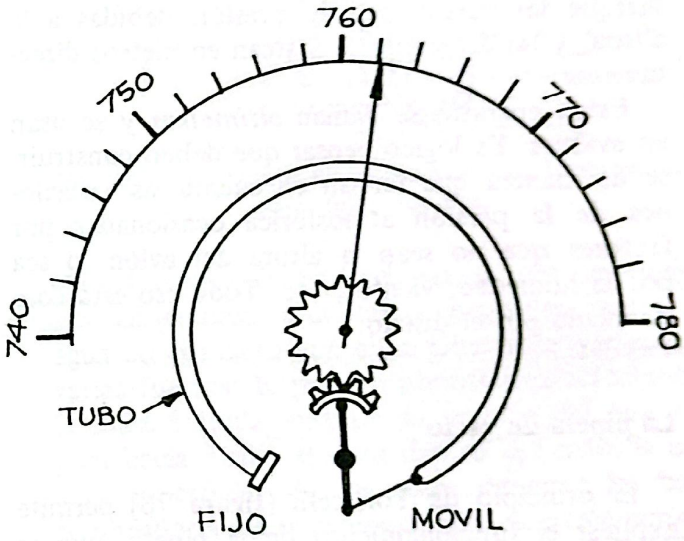


Fig. 101. Montaje del barómetro aneroide de Bourdón

Además de corregir el efecto de la capilaridad debe corregirse el efecto de corrimiento del cero de la escala por el mercurio que del tubo pasa a la cubeta cuando baja la columna. Para eso algunos barómetros tienen un fondo de material flexible que puede adecuarse al nivel cambiante en la cubeta mediante un tornillo que empuja ese fondo.

En lugar de cubeta y tubo, puede hacerse un tubo único con ramas dobladas, estando una abierta y la otra cerrada. Funciona de idéntica manera y toma el nombre de barómetro de sifón.

La técnica reemplazó pronto al barómetro de mercurio por modelos más prácticos, los que se llamaron *aneroides*. Entre ellos el más difundido es el modelo de Bourdon, ilustrado en la figura 101. Consiste en un tubo de forma circular al cual se le ha extraído el aire interior; uno de sus extremos está fijo y el otro actúa sobre una palanquita que mueve a una cremallera, la que a

su vez acciona una rueda dentada provista de una aguja. La escala da indicaciones directas en mm de mercurio. La presión atmosférica actúa sobre el tubo al vacío, de tal modo que cuando disminuye, el tubo tiende a enderezarse y manda la aguja hacia atrás y cuando aumenta, se cierra el arco y la aguja gira hacia la derecha.

Altímetros

El mismo principio usado para medir la presión atmosférica puede emplearse para determinar la altura sobre el nivel del mar a que se tiene el aparato. En efecto, dijimos que la presión atmosférica variaba con la altura por estar originada por el peso de las capas atmosféricas; luego, un barómetro puede estar preparado de manera que marque las variaciones de presión debidas a la altura, y las divisiones se marcan en metros directamente.

Estos aparatos se llaman *altímetros* y se usan en aviones. Es lógico pensar que deben construirse de manera que tengan en cuenta las variaciones de la presión atmosférica ocasionadas por factores que no sean la altura del avión, o sea por la humedad, vientos, etc. Todo eso está contemplado por el diseño.

La pipeta de vacío

El principio de Torricelli (figura 76) permite explicar el funcionamiento de la pipeta, que se emplea para sacar muestras de líquido de un recipiente que no está provisto de canilla para tal objeto. Se trata de un tubo cuya forma es generalmente como la que muestra la figura 102,

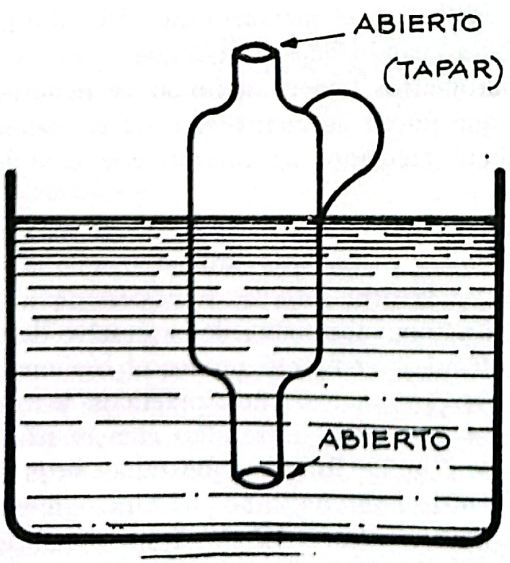


Fig. 102. – La pipeta permite tomar líquido de un recipiente.

abierto en ambos extremos. Para usarlo se sumerge en el líquido y luego se tapa con el dedo el extremo superior y así tapado se retira el tubo hacia arriba mediante la manija de que está provisto. La presión atmosférica actúa hacia arriba en el orificio inferior abierto y mantiene la columna líquida mientras se mantenga tapado el extremo superior. Cuando se llega con la pipeta al nuevo destino de ese líquido se quita el dedo obturador y el contenido caerá.

El sifón

Otra aplicación de la presión atmosférica para el movimiento o trasvase de líquidos la tenemos en el sifón, ilustrado en la figura 103. Consiste

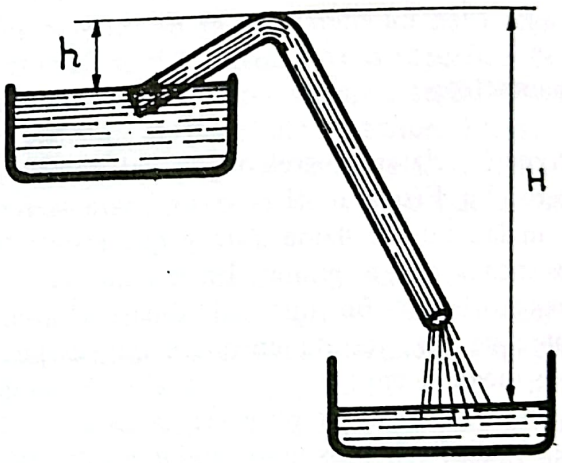


Fig. 103. – El sifón sirve para transvasar líquidos entre dos depósitos.

en un tubo acodado que se sumerge por su extremo corto en un recipiente colocado más alto que el otro al cual se quiere pasar el líquido. Para que funcione el dispositivo hay que llenar el tubo con el líquido, tapar ambos extremos y sumergir el brazo corto en el líquido; de inmediato se destapan los extremos y entonces el líquido comienza a fluir desde el depósito superior al inferior. También se logra el inicio de la operación produciendo una succión por el extremo inferior del sifón.

Analicemos el motivo por el cual el líquido se trasvasa solo. Al principio del capítulo anterior habíamos encontrado que la presión de una columna líquida estaba dada por el producto de la altura de la misma por el peso específico del líquido; no hay inconveniente en suponer que tenemos agua y su peso específico igual a la unidad nos simplifica la explicación. En la boca superior del sifón actúan dos presiones: la atmosférica p_a y el peso de la columna de altura h; la primera en una fuerza ascendente y la segunda

descendente. En la boca inferior actúan la presión atmosférica, como fuerza ascendente y el peso de la columna de altura H como descendente. La fuerza o presión resultante sobre la masa líquida dentro del sifón es la diferencia:

$$p_a - h - (p_a - H) =$$
$$= p_a - h - p_a + H =$$
$$= H - h$$

Que da un resultado positivo y descendente, o sea que la masa líquida dentro del sifón será impulsada a descender hacia el depósito inferior; la condición es que H sea mayor que h y que la diferencia no supere a la altura máxima de Torricelli, o sea 10 metros teóricos para el agua y la que resulte para otros líquidos.

Obsérvese que estos dispositivos podrían haber sido estudiados en el capítulo anterior, sobre líquidos y que las bombas, la prensa hidráulica y los vasos comunicantes estudiados en esa oportunidad, podrían haberse dejado para el presente capítulo. Ya hemos hablado de esas superposiciones inevitables en la Física.

Las bombas de compresión

La acción combinada de gases y líquidos y sus usos prácticos se manifiesta en otras aplicaciones de la Física. La inyección de un gas en un líquido produce una especie de vaporización que hace salir al líquido del recipiente en que se encuentra. La gran difusión alcanzada por el uso de aerosoles ha permitido conocer esta aplicación de los gases. En realidad el gas forma burbujas en la masa líquida, comunicándole a la misma su propiedad expansiva y haciendo que el líquido se comporte como un gas. Una vez liberadas las partículas líquidas en el aire, vuelven a comportarse como líquido y caen por su peso, mientras que las de gas se expanden y se mezclan con el aire.

Antes que se aplicara este principio para cosméticos, pinturas, etc. ya se usaba en algunos aparatos como la bomba Mammut, cuyo esquema vemos en la figura 104. Consiste en sumergir en la masa líquida profunda un caño en cuyo extremo inferior se introduce el extremo de un tubo por el cual se insufla aire comprimido mediante un aparato llamado *compresor*. El aire entra en la masa líquida y forma burbujas en su seno, lo que ocasiona una reducción del peso específico de la mezcla, la cual asciende entonces por el caño y pasa al depósito superior.

El fenómeno aparece combinado con una acción dinámica de las burbujas de aire, las cuales, por adherencia, arrastran a pequeñas masas de agua en contacto con ellas. Obsérvese que actúan varias fuerzas: la presión atmosférica actúa sobre la masa líquida inferior; la presión del aire empuja hacia arriba el agua dentro del caño; la tensión superficial de las gotas de agua las hace acompañar a las burbujas de aire en su movimiento ascendente; el peso de la columna de agua dentro del caño actúa hacia abajo; la presión atmosférica actúa también sobre la boca de salida superior, como fuerza de oposición. La combinación de todas esas fuerzas dan una resultante que es ascendente con respecto a la masa agua-aire, la cual por lo tanto adquiere un movimiento de ascenso.

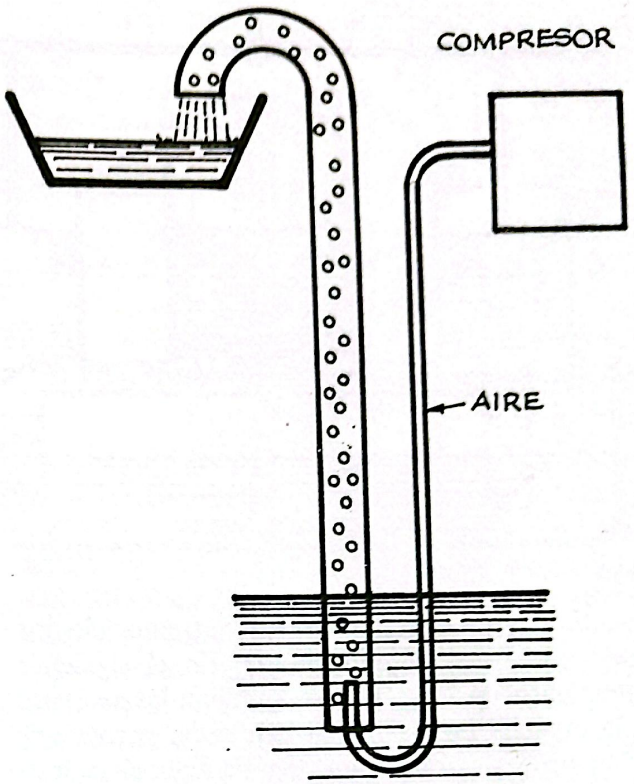


Fig. 104. – La bomba de compresión tipo Mammut sirve para elevar líquidos.

Otro tipo de bomba que actúa por compresión, pero que se diferencia netamente de la anterior es la bomba de incendio que se ilustra esquemáticamente en la figura 105. Tiene dos bombas cilindricas C comunicadas mediante válvulas V con un depósito de impulsión I hermético. Los pistones de las bombas están accionados por el movimiento de sube y baja de la manija MM articulada en su centro O. Cuando sube el pistón de la izquierda cierra su válvula V y sube agua del depósito D, pero al mismo tiempo baja el pistón de la derecha, abre su válvula y el agua pasa al recinto I comprimiendo al aire y originando una presión P. Nótese que esto está ayudado por las

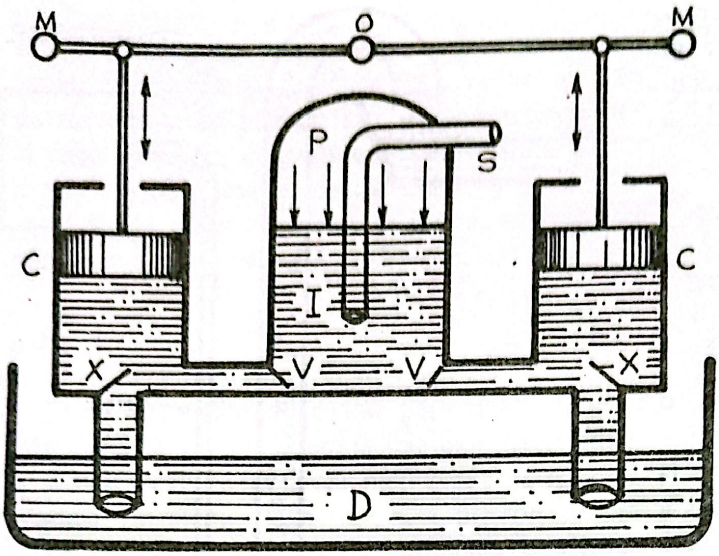


Fig. 105. – Corte esquemático de una bom
ba de incendios.

válvulas *XX* que están en los extremos de los tubos que bajan al depósito *D*. En el siguiente movimiento de la manija se cambian las acciones de la derecha por las de la izquierda, pero siempre el proceso termina en pase de agua al recinto *I* que aumenta la presión *P* que reina en su interior.

Hay un caño de salida *S* en el recinto impulsor *I* que permite la salida del agua con gran fuerza. Si la presión interior la medimos en atmósferas, puede decirse que el chorro de agua alcanzará una altura teórica de:

$$10\,P \text{ (metros)}$$

donde *P* es esa presión interior. En la práctica sabemos que cada atmósfera no alcanza al valor de 10 metros de altura de agua sino que se toman unos 7 metros, pero de todos modos se ve que el chorro puede alcanzar alturas o distancias considerables.

Depresores y compresores

La presión de un gas contenido en un recinto puede ser disminuida o aumentada según sea necesario, mediante aparatos mecánicos que, por actuar sobre los gases, se llaman neumáticos. Para disminuir la presión del gas basta extraer una cierta cantidad del mismo y para aumentarla, por contraposición, hay que introducir más gas en el recinto. Los aparatos que disminuyen la presión se llaman *depresores* y los que la aumentan, *compresores*.

Comencemos por el depresor, cuyo montaje esquemático se ve en la figura 106. El recinto con el gas es *R*, que está comunicado al cuerpo de bomba con pistón o émbolo *P* mediante una válvula V_1, a resorte o de otro tipo. Una segund válvula V_2 comunica con el ambiente, si maneja mos aire, o con el depósito si se trata de otr gas. Si se observan las posiciones de las válvula notaremos que al succionar con el pistón mediar te su movimiento hacia la derecha, sale gas de por V_1 y se mantiene cerrada V_2. Al mover hacia la izquierda, se cierra V_1 y se abre V_2 expulsando al gas por el orificio de esta última La operación continúa hasta que el enrarecimien to o depresión en el recinto *R* alcanza el valo deseado.

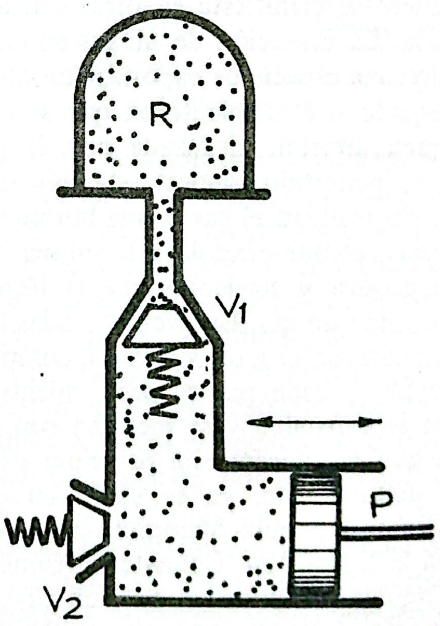


Fig. 106. – Principio de funcionamiento de un disposi-
tivo depresor.

Si con el depresor queremos quitar todo el aire de *R* tenemos la *bomba de vacío*. Pero se nota de inmediato que para ello, cuando está abierta V_1 habrá la misma presión en *R* que la

que hay en el espacio cerrado a la izquierda de *P*. Las sucesivas emboladas van reduciendo esa presión, pero no puede alcanzarse el valor cero para la misma; dicho en otros términos, con una máquina de vacío tan simple no se puede lograr el vacío absoluto. Para mejorar la situación se hace que el espacio a la izquierda de *P*, llamado *nocivo*, sea muy pequeño con respecto a *R*; esto obliga a dar mayor cantidad de emboladas y la relación de vacío lograda es mayor. En las maquinas de vacío suele haber dos o mas cilindros de succión, cada una de las cuales efectúa un salto de depresión.

Si invertimos la posición de las válvulas del depresor tenemos el dispositivo que muestra la figura 107, que es un *compresor*. En efecto, al

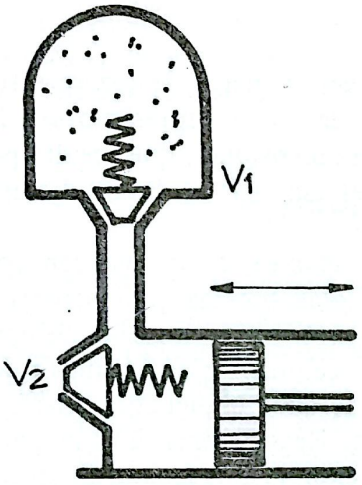


Fig. 107. – Principio de funcionamiento de un compresor de gas.

mover al pistón hacia la izquierda se cierra V_2 y se abre V_1, con lo que el aire contenido en el cilindro pasa al recinto *R* aumentando la presión en el mismo. Al correr el pistón hacia la derecha, se cierra V_1 y se abre V_2, con lo que entra más aire por ésta, el cual será impulsado hacia *R* en la siguiente embolada. El compresor que necesitábamos en la bomba de la figura 104 puede ser de este tipo. Constructivamente los compresores pueden diferir del ilustrado, pero el principio de funcionamiento es el explicado.

La extracción del aire de un recinto hasta lograr el vacío en un grado razonable, según la calidad de la máquina depresora, permite hacer muchos experimentos. En primer lugar, la presión atmosférica actúa sobre las paredes exteriores del recinto y dentro del mismo no hay *contrapresión*. Esto se demostró mediante la llamada esfera de Magdeburgo (figura 108), que consiste en una esfera hueca cortada por la mitad, de tal modo que las dos partes calcen perfectamente. Haciendo el vacío en su interior la presión atmosférica las mantiene unidas y soporta fuerzas *F* que traten de separarlas. En el clásico experimento realizado en la mencionada ciudad alemana, se utilizaron caballos para hacer las fuerzas de tracción *F* y no se separaron las semiesferas. Otro experimento consiste en colocar un globo semiinflado en un recinto al cual se le extrae el aire; al hacerlo, el globo se va hinchando porque su presión interior, con ser baja, va superando a la que hay en el recinto.

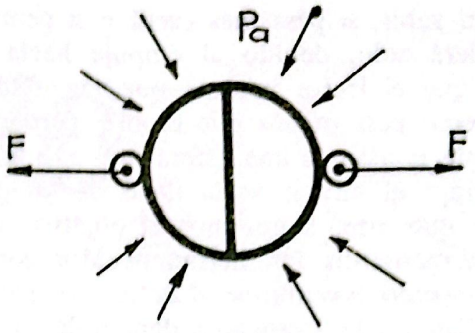


Fig. 108. – Las semiesferas adosadas y vacías resisten la tracción externa.

Empuje hacia arriba

El principio de Arquímedes estudiado en Hidráulica tiene validez en Neumática, de modo que podemos decir que todo cuerpo en el aire sufre una pérdida de peso igual al peso del aire que desaloja. Entiéndase que el cuerpo tiene un cierto volumen *V*, que es el encerrado por su contorno; si el cuerpo es hueco, pero hermético, se toma el volumen exterior mientras que para un vaso, por ejemplo, se debe tomar el volumen del vidrio solamente.

Lo dicho nos permite deducir que si un cuerpo pesa igual que el aire que desaloja, flotará sin

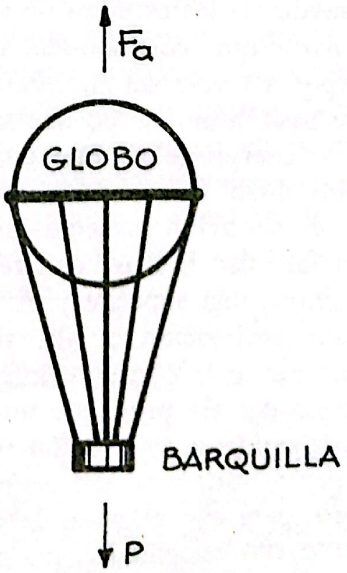


Fig. 109. – El globo aerostático asciende por el empuje hacia arriba.

caer ni subir; si pesa más caerá y si pesa menos ascenderá solo, debido al empuje hacia arriba. Claro que el lector pensará que no es fácil que un cuerpo pese menos que el aire, pero recordemos que si usamos una esfera hueca, a la cual se le extrajo el aire o se la llenó de un gas más liviano que éste, lograremos el objetivo. Esto es lo que pensaron los hermanos Montgolfier en 1783 cuando inventaron el *aeróstato* que vemos en la figura 109. Colocaron dentro del globo aire caliente, con lo que la densidad del mismo era menor que la del aire frío exterior y colgaron una barquilla liviana y unas cuantas piedras. El peso del globo más la barquilla, el aire caliente y las piedras era igual al del aire que correspondía al volumen desalojado. Dejando caer unas piedras el globo ascendía y para descender, dejaban escapar un poco del gas del globo.

Haciendo cifras, si al peso del aire desalojado los llamamos P_a y al peso del globo P, la fuerza ascencional tendrá un valor:

$$F_a = P_a - P$$

Y según sea mayor el primer término o el segundo del segundo miembro de la ecuación, el cuerpo ascenderá o caerá.

Los globos aerostáticos se usaron en el pasado para navegar por el aire; luego aparecieron los dirigibles, que en lugar de forma esférica tenían la de un gran cigarro. Dentro se les colocaba helio o hidrógeno, ambos más livianos que el aire. Pero las descargas eléctricas atmosféricas hicieron estragos y los progresos de la aviación relegaron al olvido al vuelo aerostático.

Aerodinámica

Precisamente el progreso de la aviación que mencionamos se logró mediante los estudios de la Aerodinámica, en la parte que corresponde al desplazamiento de cuerpos a través del aire. Para que la masa de aire deje pasar a un cuerpo que se desplaza con rapidez, ese cuerpo debe tener una forma que la costumbre hizo llamar aerodinámica. El perfil del ala de un avión presenta esa forma y deja pasar con facilidad la masa de aire, la cual forma dos corrientes, una superior y otra inferior. Dando adecuada inclinación al ala, se logra que la presión que ejerce la corriente inferior sobre la cara inferior del ala provoque una fuerza de ascenso. Corrigiendo esa inclinación se puede mantener la posición horizontal del avión o aun el descenso. Claro, para ello el avión debe desplazarse hacia adelante con velocidad v, figura

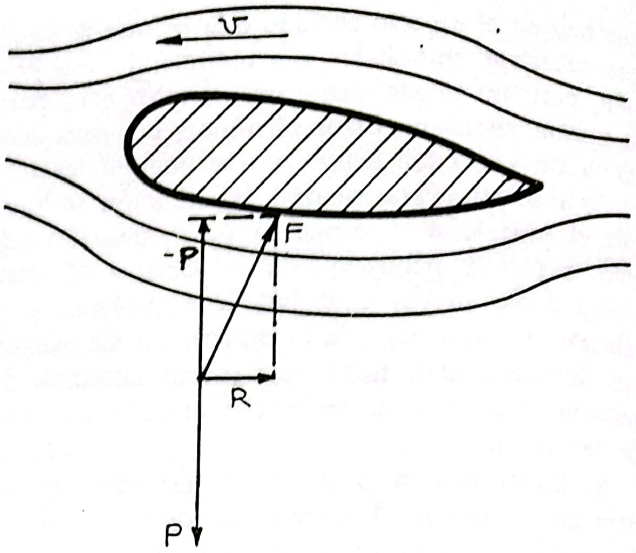


Fig. 110. – Acción de las corrientes de aire sobre el ala de un avión.

110, y vencer la fuerza de rozamiento con el aire R. El peso del avión representa una fuerza P y F es la fuerza ascensional, que resulta perpendicular al perfil del ala; $-P$ es la equilibrante del peso del avión.

Toda la técnica de la aviación consiste en el estudio de esas fuerzas y esos perfiles. El movimiento de avance se lograba siempre mediante una hélice accionada por un motor de nafta pero hace algunos años comenzó a usarse el principio de reacción. Recordemos el principio de igualdad entre la acción y la reacción. Si en un recinto R, figura 111, producimos la combustión instantánea de un gas altamente inflamable, el producto de esa combustión saldrá por el orificio posterior con gran fuerza, por el aumento brusco de volumen de los gases del proceso. Esa fuerza expansiva provoca una reacción igual y contraria, o sea una fuerza de avance, hacia la izquierda en la figura, que puede aprovecharse para impulsar al avión si el recinto R lo fijamos al mismo. Este dispositivo tomó el nombre de motor a reacción y su principio recuerda al de los cohetes, en los cuales la fuerza expansiva la produce una substancia química en la cual se provoca una detonancia encendiéndola.

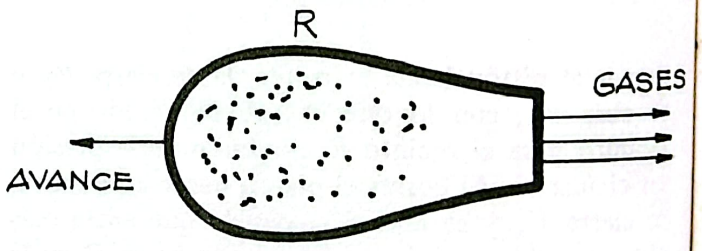


Fig. 111. – El principio del motor a reacción.

Día 10

Muchas de las cosas que ocurren en la naturaleza, incluso la vida misma de los seres, depende de un agente físico invisible: el calor. El hombre puede sobrevivir dentro de dos niveles límites de calor; lo usa para cocinar sus alimentos y les quita el calor que tienen para conservarlos; se abriga para mantener el calor de su cuerpo y reduce su vestimenta para ayudar a que el aire le quite parte de su calor cuando lo siente en exceso. Un agente físico de tal importancia debe ser estudiado muy detalladamente, debe ser evaluado prolijamente y deben describirse sus aplicaciones. El estudio del calor lo hemos subdividido en dos partes, una que se refiere a medirlo, conocer sus efectos y transportarlo, y la otra a conocer sus aplicaciones y describir los aparatos que las realizan. Esta jornada estará dedicada a la primera parte del estudio del calor, o sea a la Termología, cosa que iniciamos de inmediato.

ESTUDIO DEL CALOR – TERMOLOGIA

La parte de la Física que estudia el calor, sus propiedades, efectos y transformaciones, se llama Termología. En ella se estudia la forma de calcular la cantidad de calor que tiene un cuerpo, la cantidad que necesita para cambiar de estado físico, el nivel térmico de los objetos y del ambiente, los efectos físicos, químicos y mecánicos del calor, etc.

Tomaremos como principio fundamental, que no puede concebirse la noción de ausencia absoluta de calor, que no puede existir un cuerpo sólido, líquido o gaseoso que no contenga aunque sea una mínima cantidad de calor en su masa. Lo que distinguimos por los términos frío y caliente son estados relativos, de acuerdo con nuestras sensaciones. Así decimos que el hielo es frío, pero eso se debe a que su nivel térmico es inferior al de nuestro tacto, produciéndonos la sensación conocida. El hielo tiene en sí una cierta cantidad de calor, indudablemente menor que si esa misma cantidad de hielo estuviera en estado líquido (agua) y menor aun que si estuviera en estado gaseoso (vapor). Pero tiene calor, porque para producir hielo hay que sacarle calor al agua, pero no todo; bastan unas 80 unidades térmicas por Kg. si está a la temperatura adecuada.

Observemos que se ha hablado de unidades térmicas, temperatura, quitar y poner calor, etc. Todos esos conceptos son de gran importancia en la Termología, de manera que comenzaremos por definirlos.

Temperatura

Si una cierta cantidad de calor, digamos unas 20 unidades térmicas, que definiremos más adelante, se entregan a un cuerpo, tal cuerpo se calentará. Pero si las entregamos a un cuerpo más pequeño, se calentará más aun por tener menos masa. Ello se traduce en una sensación de que el segundo cuerpo estará más caliente que el primero, tendrá mayor temperatura. La temperatura puede definirse como el nivel o estado térmico de un cuerpo.

No se confunda cantidad de calor con temperatura, pues de intento hemos puesto el ejemplo de un cuerpo grande y otro chico que recibían la misma cantidad de calor y sin embargo el más pequeño alcanzaba una temperatura mayor. La temperatura indica solamente el nivel térmico del cuerpo, sin conocerse la cantidad de calor que posee almacenada en su masa. Claro que si dos cuerpos exactamente iguales, en forma, tamaño y substancia tienen igual temperatura, podemos decir que tienen también iguales cantidades de calor.

Termómetros

Son aparatos o dispositivos que sirven para indicar la temperatura que tiene un cuerpo, la cual se mide en grados. Se habla de una cierta cantidad de grados, y hay varias escalas, según el

país de origen. Tenemos así la escala Celcius o centígrada que es la que se usa en nuestro país, la escala Fahrenheit, la Reaumur, la Beaumé, etc. Las tres primeras son las que se usan aún actualmente, siendo más comunes la centígrada y la Fahrenheit.

A fin de establecer comparaciones entre las escalas debe conocerse la manera cómo fueron fijadas. En general se tomaron dos temperaturas fijas que se pudieran reproducir con facilidad y que son las que permiten trazar el resto de la escala comprendida entre ambas y fuera de esos límites.

Los límites elegidos en casi todos los casos, son el punto de ebullición del agua y el de fusión del hielo. La fijeza de tales temperaturas en las condiciones de presión atmosférica estipuladas (760 mm) permiten construir fácilmente termómetros de igual escala.

Un termómetro común está compuesto por un tubo cilíndrico de vidrio (figura 112) con un

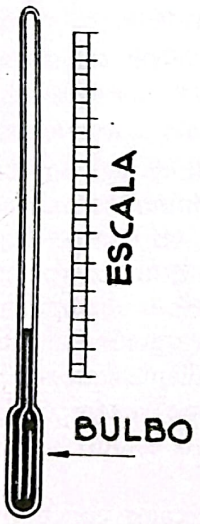


Fig. 112. - Principio del termómetro de mercurio.

ensanchamiento inferior o bulbo y conteniendo mercurio, toluol, etc., líquidos que tienen la propiedad de dilatarse con facilidad con el calor. Junto al tubo se coloca la escala, graduada entre los puntos extremos citados.

Para construir un termómetro se coloca el líquido dejando abierta la extremidad superior del tubo. Calentando convenientemente el bulbo, el mercurio se vaporiza y expulsa al aire contenido en el tubo, pudiéndose cerrar después el extremo. Luego se mantiene durante un rato una temperatura de 300°C y se deja enfriar.

Los puntos fijos de la escala o índices superior e inferior se determinan de la siguiente manera:

El punto fijo superior es el que corresponde al agua en ebullición, y se obtiene colocando el termómetro dentro de un recipiente de manera que reciba directamente los vapores de agua en ebullición. Marcando el nivel a que llega el mercurio se tiene el punto superior de la escala, que se eligió igual a:

100° para la escala Centígrada

80° para la escala Reaumur

212° para la escala Fahrenheit

El punto fijo inferior es el que corresponde a la fusión del hielo, de modo que para determinarlo se sumerge el bulbo en una cubeta con hielo fundente y después de estabilizada la temperatura se marca el punto inferior de la escala. Ese punto en las distintas escalas vale:

0° en la escala Centígrada

0° en la escala Reaumùr

32° en la escala Fahrenheit

De acuerdo con los puntos superiores e inferiores de las distintas escalas, se ve enseguida que la cantidad de grados en que se ha dividido cada una de ellas es:

100° la Centígrada

80° la Reaumur

180° la Fahrenheit

Lo que permite establecer relaciones para calcular temperaturas que no estén expresadas en grados centígrados (°C). Esas relaciones son:

$$°C = \frac{5}{4} °R$$

Es decir que si se conoce una temperatura dada en grados Reaumur, basta multiplicarla por 5 y dividirla por 4 para tener los grados centígrados equivalentes. Además:

$$°C = \frac{5}{9} (°F - 32)$$

Que dice que si se tiene una temperatura dada en grados Fahrenheit, para pasar a grados centígrados se le restan 32 y se multiplica ese resultado por 5 y se lo divide por 9.

Las escalas termométricas no terminan en los puntos límites, pues una vez que se tiene un grado, por división del total en el número de partes iguales que se citó más arriba, se pueden hacer escalas bajo cero y sobre 100, en la centígrada y similarmente en las otras. La temperatura tal que no existe nada de calor en los cuerpos se llama *cero absoluto* y corresponde a -273°C o sea 273 grados bajo cero.

Partiendo de tal consideración, Lord Kelvin creó la escala que lleva su nombre, se llama absoluta, y tiene su punto cero a -273°C. Los grados de dicha escala son iguales a los centígrados, de modo que la temperatura absoluta de ebullición del agua es de 373°K (grados Kelvin).

Los termómetros de bulbo son exactos, pero requieren un tarado y una construcción costosa, de modo que se han ideado tipos más económicos, metálicos, que se basan en la dilatación de los metales por el calor. Construyendo una espiral con dos metales adosados, de distinto coeficiente de dilatación, cuando se enfría se cerrará, produciendo un giro del eje y cuando se calienta se abrirá, produciendo un giro en sentido contrario (figura 113). Por comparación con un termómetro de bulbo se marcan en una escala los grados correspondientes a posiciones diversas de la aguja. Son de fácil lectura y de construcción en serie, pues si las espirales son idénticas, también pueden serlo las escalas y sus graduaciones. Los hay en escalas centígrada, Fahrenheit y Reaumur.

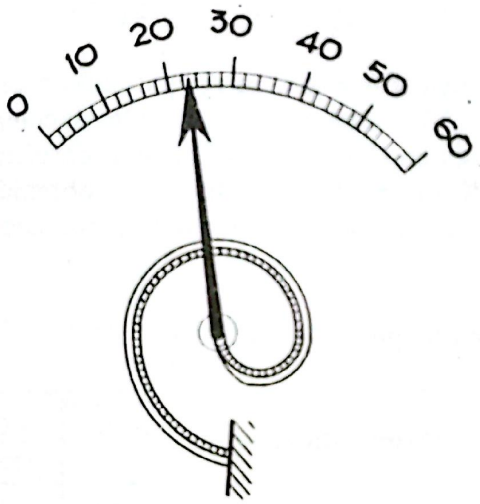


Fig. 113. – Principio del termómetro a espiral bimetálica.

Termómetros de máxima y mínima

Para registrar las temperaturas máximas o mínimas diarias o ambas a la vez, se hace uso del termómetro esquematizado en la figura 114, que es de alcohol y mercurio, este último empleado como auxiliar. El tubo es curvado arriba y debajo y apoyados en los dos meniscos del mercurio están los índices móviles, que son arrastrados por empuje, pero que al retroceso del mercurio quedan en su posición extrema por adherencia con las paredes del tubo.

Cuando sube la temperatura el alcohol se dilata, empuja al mercurio y al índice de máxima

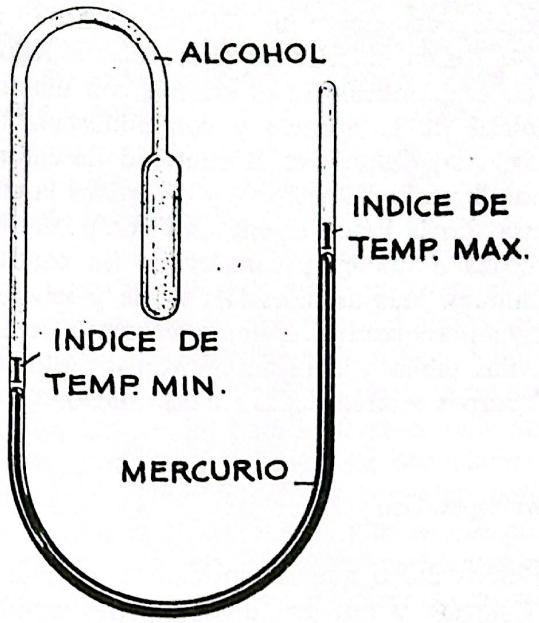


Fig. 114. – Disposición del termómetro de máxima y mínima.

hasta que llega la temperatura mayor del día. En ese momento comienza el descenso de la columna mercurial de la derecha porque comienza a contraerse el alcohol, pero el índice queda adherido a las paredes del tubo y no baja, quedando marcando la temperatura máxima diaria.

Cuando baja la temperatura el alcohol se contrae y la columna mercurial de la izquierda sube, empujando al índice hasta que se llega a la temperatura mínima del día, para la cual el índice alcanzó su posición más alta. Al comenzar a subir la temperatura el mercurio comienza a bajar, pero no el índice, que queda adherido a las paredes del tubo indicando la mínima diaria.

Los índices se construyen de metal magnético, a fin de poderlos retirar de su lugar y volverlos a apoyar en la columna de mercurio al día siguiente, mediante un imán que se apoya en la pared del tubo y se lo hace deslizar, arrastrando al índice. El tema de los imanes será estudiado más adelante.

Calor contenido en los cuerpos

Conociendo el concepto de temperatura y pudiendo medirla, pasaremos ahora a definir la cantidad de calor, cuya unidad es la *caloría*. Para tal fin imaginemos que queremos calentar agua y tomemos un litro de la misma, elevando su temperatura en 1°C. La cantidad de calor que absorbió el agua es una caloría, llamándosela también una *Kilocaloría* para diferenciarla de la *gramocaloría*, que se refiere a la cantidad de calor

necesaria para elevar en 1°C un gramo de agua.

Una forma práctica de diferenciar la Kilocaloría de la gramocaloría es escribir con mayúscula la inicial de la primera y con minúscula la segunda. Así, *Caloría* es la cantidad de calor que hemos llamado Kilocaloría y *caloría* es la gramocaloría. En la Física se emplean una u otra según las cifras a manejar, para evitar las cantidades incómodas. Más usual es la Caloría y salvo especificación en contrario, nos referiremos siempre a ella. Las tablas y constantes propias de los diversos cuerpos estarán dadas en esa unidad.

Calor específico

Hemos dicho que la cantidad de calor se mide en Calorías y que esa unidad corresponde a la necesaria para elevar en 1°C un litro de agua. Pero si tomamos otro cuerpo distinto, la cantidad de calor necesaria para aumentar su temperatura en 1°C será distinta a una Caloría, pues hay cuerpos que tienen mayor o menor capacidad calorífica que el agua.

Podemos definir así al calor específico, como la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de un Kg del cuerpo en 1°C. Para el agua esa cantidad de calor es una Caloría, de manera que el calor específico del agua vale uno. Para otros cuerpos, la tabla adjunta da las cantidades de calorías necesarias para calentar un Kg de los mismos de manera de elevar su temperatura en 1°C.

En virtud de las definiciones precedentes, se puede calcular la cantidad de calor que se debe entregar a cualquier cuerpo para elevar su temperatura en una cierta cantidad de °C. Para ello, basta considerar el peso de la substancia, su calor específico y la elevación de temperatura, siendo evidente que la cantidad de Calorías necesarias serán:

$$Q = P\,c\,(t_f - t_i)$$

En cuya fórmula Q es la cantidad de calor que absorberá la substancia o que se le debe entregar, expresada en Calorías; P es el peso de dicho cuerpo en Kg; c es el calor específico obtenido en la tabla dada; t_f es la temperatura a que debe llegar el cuerpo y t_i la que tenía, ambas en °C. El paréntesis con la resta no expresa otra cosa que la elevación de temperatura deseada, que se conoce siempre y que puede colocarse directamente, prescindiendo de hacer la resta en la fórmula.

Calor específico de diversos cuerpos (calorías por °C y por Kg)

Cuerpo (sólidos)	Calor específico	Cuerpo (líquidos)	Calor específico
Acero	0,115	Aceite oliva	0,40
Aluminio	0,22	Aceite lubricante	0,40
Carbón	0,20	Acido sulfúrico	0,33
Cobre	0,094	Alcohol	0,58
Estaño	0,056	Amoníaco	1,00
Hielo	0,50	Agua	1,00
Hierro	0,115	Anilina	0,49
Mercurio	0,033	Eter	0,54
Plomo	0,031	Glicerina	0,58
Vidrio	0,20	Naftalina	0,31
Zinc	0,094	Petróleo	0,50

La forma de establecer comparaciones es fijando al agua como cuerpo básico, al que se le asigna una capacidad calorífica unitaria. De tal modo un cuerpo que necesite mayor cantidad de calor por Kg y por °C que se desee elevar su temperatura, diremos que tiene una *capacidad calorífica* o *calor* específico mayor que el del agua. Si al agua le asignamos un calor específico igual a la unidad (uno), a dicho cuerpo le corresponderá un número mayor que uno. Viceversa, si un cuerpo necesita menor cantidad de calor para elevar en 1°C la temperatura de un Kg de substancia, su calor específico será menor que uno.

Dilatación por efecto del calor

Todos los cuerpos aumentan de tamaño al calentarse, con la única excepción del agua, que entre 0°C y 4°C se contrae, al pasar de la primera temperatura a la segunda. El aumento de ta-

maño debido a la acción del calor se llama *dilatación* y tiene características que dependen de la substancia.

Se distingue el caso de dilatación lineal y dilatación cúbica. La primera se estudia en el caso de las barras y cuerpos de gran longitud y reducida sección transversal. Para los demás casos se habla de dilatación cúbica, o sea el aumento de volumen por unidad o referido al total. La dilatación lineal se refiere al aumento de longitud.

Cada material tiene distintas características de dilatación, habiendo algunos notables por su gran variación de tamaño ante las variaciones de temperatura y otros que se distinguen por la propiedad contraria, es decir, invariabilidad o insensibilidad a los efectos del calor. Como ejemplos típicos podemos citar al plomo como cuerpo extremadamente dilatable y al cuarzo como cuerpo insensible.

Para especificar los valores de la dilatación se utiliza un *coeficiente de dilatación*, que es el aumento relativo de la dimensión por °C. Así, el coeficiente de dilatación lineal de un cuerpo es el aumento de longitud, expresado en metros, que sufre una barra de 1 m de longitud cuando se aumenta su temperatura en 1°C. Del mismo modo definiremos al coeficiente de dilatación cúbica, como el aumento de volumen expresado en m^3 que sufre un trozo de 1 m^3 de una substancia determinada cuando se aumenta su temperatura en 1°C.

Y como para cada substancia hay distintos valores de los respectivos coeficientes de dilatación, se confeccionan tablas que dan tales coeficientes. En general se emplea el coeficiente de dilatación lineal para los metales y el de dilatación cúbica para los demás cuerpos sólidos, para los líquidos en general y para los gases licuados. Tales tablas dan los valores de los coeficientes medios entre grandes límites de temperatura, pues son muy variables. Para los metales, se dan en el cuadro los valores medios entre 0°C y 100°C en mm de aumento de longitud por metro de barra y por °C.

Fusión de los sólidos

En el capítulo 1 se estudiaron los cambios de estado físico de los cuerpos, definiéndose la fusión como el paso del estado sólido al líquido. Tal cambio se desarrolla mediante la intervención del calor. Un sólido, para licuarse o, más correctamente, para fundirse, necesita una cierta cantidad de calor, perfectamente conocida para los casos comunes. Para poder fundir un cuerpo hay que calentarlo hasta alcanzar una temperatura llamada: *punto de fusión*, sin llegar a la cual la operación será imposible. Una vez alcanzada esa temperatura todavía hay que entregarle más calor, en cantidad igual al llamado *calor latente de fusión* del cuerpo.

De manera que para fundir cuerpos, hay que elevar su temperatura mediante el calor hasta llegar al punto de fusión y luego hay que entregarle tantas Calorías más como cantidad de calor de fusión tenga el cuerpo. Si llegada a la temperatura de fusión no se le agrega ese calor latente de fusión, no se producirá el cambio de estado completo, sino que se formará un estado pastoso característico.

Resulta particularmente interesante conocer los puntos o temperaturas de fusión de algunos cuerpos usuales, así como sus calores latentes de fusión, para poder determinar en cada caso la cantidad de calor que será necesaria para fundir un Kg de dicho cuerpo. Para fundir más cantidad, se requerirá un número de Calorías proporcionalmente más grande. El calor de fusión se da en Calorías por Kg para mayor comodidad.

Coeficientes de dilatación lineal y cúbica de algunas substancias

Substancia (sólidos)	Dilatación lineal mm/m °C	Substancia (líquidos)	Dilatación lineal m^3/m^3 °C
Aluminio	0,024	Aceite de oliva	0,0009
Bronce	0,0175	Acido sulfúrico	0,00072
Cobre	0,0165	Agua	0,00018
Cristal de cuarzo	0,0005	Alcohol	0,0011
Estaño	0,0266	Benzol	0,0012
Hierro	0,0122	Eter	0,0016
Níquel	0,0120	Glicerina	0,0005
Plomo	0,0292	Mercurio	0,0018
Zinc	0,0165	Petróleo	0,0010

La cantidad de calor que necesitamos para fundir un cuerpo estará dada entonces por la siguiente fórmula:

$$Q = P\,c\,(t_f - t) + Q_f$$

donde P es el peso del cuerpo en Kg; c es el calor específico que se da en la tabla conocida; t_f es la temperatura de fusión en °C y t la temperatura a que se halla el cuerpo en °C; y Q_f es el calor latente de fusión, dado en la tabla adjunta.

Por ejemplo, el punto de fusión del hielo es 0°C, pero para convertirse en agua nesecesita 80 Calorías por Kg, es decir, que el calor latente de fusión del hielo es igual a 80. No basta que el hielo esté a 0°C para que funda; debe absorber además 80 Cal (abreviatura de Calorías) por Kg.

Puntos de fusión y calores latentes de fusión de algunos cuerpos

Cuerpo	Punto de fusión °C	Calor latente de fusión Cal/Kg	Cuerpo	Punto de fusión °C	Calor latente de fusión Cal/Kg
Aluminio	657	77	Mercurio	– 39	2,8
Azufre	113	9	Parafina	54	35
Cobre	1083	43	Plata	960	21
Estaño	232	14	Platino	1764	27
Hielo	0	80	Plomo	327	6
Hierro	1500	30	Zinc	419	28

Ebullición de los líquidos

El paso del estado líquido al gaseoso se llama vaporización. La temperatura a la cual se realiza el proceso se llama *punto de ebullición* y es perfectamente conocida para los líquidos comunes. El proceso se reconoce por una agitación o burbujeo característico en la masa líquida, es decir, una *ebullición.* Para vaporizar un líquido hay que llevarlo previamente a su temperatura de ebullición, y luego entregarle una cantidad adicional de calor igual a su *calor latente de vaporización.* Se nota que el cálculo se realiza en forma similar al de la fusión de los sólidos, sólo que las cifras tienen distintas cantidades y denominaciones.

Pongamos, por ejemplo, el agua. Para convertirla en vapor hay que llevarla a 100°C que sabemos es su punto de ebullición; pero una vez alcanzada esa temperatura hay que entregarle 539 Calorías por Kg para que vaporice totalmente. Luego, el calor latente de vaporización del agua es de 539 Cal. Para los demás líquidos habrá cifras diferentes, pero el proceso y el cálculo es análogo. La tabla adjunta consigna los datos para los líquidos usuales.

Para calcular la cantidad de calor necesaria para vaporizar totalmente un líquido debemos aplicar una fórmula que surge de las consideraciones anteriores y que es:

$$Q = P\,c\,(t_e - t) + Q_v$$

donde P es el peso del líquido en Kg; c es el calor específico tomado de la tabla; t_e es el punto de ebullición y t la temperatura a que se halla

Puntos de ebullición y calores latentes de vaporización de algunos líquidos

Líquido	Punto de ebullición °C	Calor latente de vaporización Cal/Kg	Líquido	Punto de ebullición °C	Calor latente de vaporización Cal/Kg
Agua	100	539	Cloro	–34	62
Alcohol	78,5	210	Cloroformo	61	58
Amoníaco	–33	300	Cloruro de metilo..	–24	97
Anhídrido carbónico	–78,5	56	Eter	35	90
Anhídrido sulfuroso	–10	95	Mercurio	357	68
Anilina	184	110	Sulfuro de carbono	46	85
Benzol	80	94	Tolueno	110	85

el líquido, ambas en °C; Q_v es el calor latente de vaporización, dado en la tabla. Obsérvese que algunos líquidos tienen su punto de ebullición por debajo de 0°C, lo que quiere decir que normalmente ellos deben estar a temperaturas bajo cero, porque a temperaturas mayores están en estado gaseoso o mezclados con otros líquidos. Tal es el caso del anhídrido carbónico, que a la temperatura ambiente es un gas, el del amoníaco diluido en agua para poderlo mantener a las temperaturas del ambiente, etc.

Ebullición retardada y acelerada

Hemos visto que el agua tiene una temperatura de ebullición de 100°C, pero puede lograrse que hierva a temperaturas diferentes a esa, mayores o menores, lo que se llama ebullición retardada o de *alta presión* y ebullición acelerada o de *baja presión*. Veamos esa particularidad.

La ebullición se puede retardar agregando sales al agua, por ejemplo sal de cocina, lo que eleva el punto de ebullición en la proporción de la sal contenida; pero este caso no es el mencionado, pues la presión durante la ebullición se mantiene normal. En cambio, el agua contenida en una caldera hermética hierve a temperaturas superiores a los 100°C. Lo que ocurre es que al calentarse el aire dentro del recinto aumenta la presión sobre la superficie del agua y se impide la formación de las burbujas, hasta que la presión molecular del agua logra iniciar el proceso. Esto fue demostrado por Papín mediante una calderita provista de un termómetro y con una tapa hermética; la ebullición comenzaba a temperaturas superiores a los 100°C. Los tiempos modernos aprovecharon ese fenómeno en las cacerolas a presión para cocinar alimentos en menos tiempo, pues al alcanzarse temperaturas mayores que 100°C la cocción se acelera.

El caso opuesto es el de la ebullición a baja presión. Si se coloca agua en un recipiente (figura 115) y se enfría el aire, se hace disminuir la presión interior, lo que facilita la formación de burbujas a temperaturas inferiores al punto de ebullición normal. Franklin realizó la experiencia de tomar el bulbo de la figura 115 y quitarle el fuego inferior cuando el agua estaba caliente; enfrió el aire mediante agua fría externa y comenzó la ebullición de la de adentro, sin haber fuego aplicado, porque la temperatura del agua, menor que 100°C, era suficiente para producir la ebullición. El lector ya habrá observado que esta figura y la explicación son las que se aplican en las máquinas de bola para hacer café, solo que la

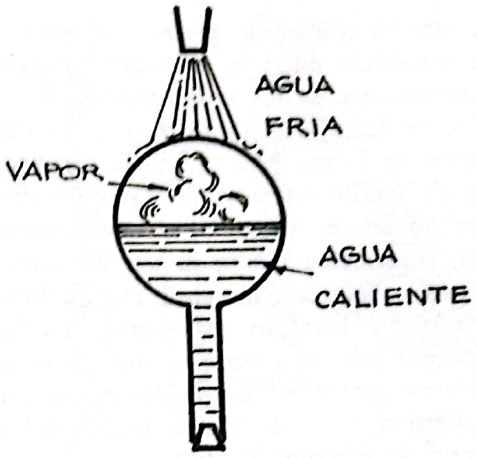


Fig. 115. Principio de la ebullición acelerada o de baja presión.

temperatura ambiente es suficiente para enfriar el aire interno y producir el fenómeno.

El vapor de agua

Calentando un líquido se llega a la temperatura de evaporación o vaporización y comienza a formarse el estado gaseoso. En particular, calentando agua a 100°C, aproximadamente, se forman vapores blanquecinos que son una mezcla de gas y líquido. El líquido es arrastrado por el gas y forma con él un todo más o menos homogéneo, que le impone la coloración característica.

Si tomamos la unidad de volumen de vapor de agua, o más comúnmente un Kilogramo de vapor, observaremos que en él hay una cierta cantidad de agua en estado gaseoso, cantidad que se llama *título* del vapor y el resto es agua en estado líquido, lo que toma el nombre de *humedad específica* del vapor. El título y la humedad específica se pueden expresar en %, teniéndose, por ejemplo, un título de 70 %, con lo que la humedad específica será de 30 %.

Bajo las condiciones señaladas, la temperatura a que se produce la vaporización está estrechamente ligada a la presión del vapor, presión que se llama: *de saturación*. Comprimiendo vapor, se produce una condensación, formándose agua nuevamente, sin que se alteren la temperatura y la presión mientras dura el proceso. Para cada presión del vapor hay una temperatura que le corresponde, y ambas magnitudes son perfectamente conocidas, dándose en tablas. Una vez que todo el vapor se ha convertido en agua, puede variar la temperatura. En resumen, el estado de saturación es aquel en el cual la cantidad de vapor que se forma depende del volumen disponible, pues las

otras dos magnitudes, presión y temperatura, están vinculadas entre sí. El vapor producido en esas condiciones se llama *saturado* y al ser comprimido se licúa parte de él, y al producirse una expansión se forma más vapor. Hay un verdadero estado de equilibrio entre el líquido y el vapor.

Para poner en evidencia lo que acabamos de afirmar, tomemos un tubo sumergido parcialmente en una cubeta con mercurio (figura 116) y en el recinto del extremo coloquemos un líquido, por ejemplo éter; el tubo está sumergido en una cubeta con mercurio. En la figura se ven tres tubos, pero se trata de tres posiciones del mismo tubo, pues lo subiremos y lo bajaremos para alterar el volumen del recinto del extremo superior. Si en ese recinto no hay aire, porque evitamos su entrada al llenarlo o porque lo sacamos, parte del éter se vaporizará y se producirá el equilibrio entre éter líquido y éter vapor, a la presión, volumen y temperatura dados.

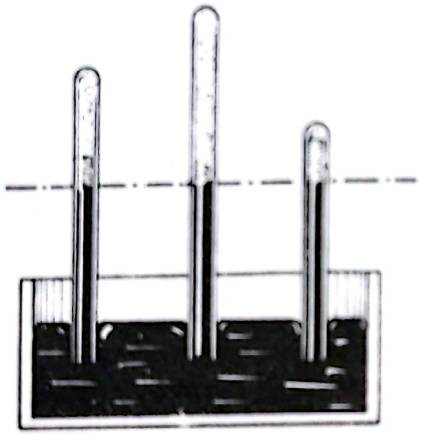


Fig. 116. – Al disminuir el volumen de vapor, parte de éste se licúa.

Si variamos el volumen subiendo al tubo, segunda posición, disminuye la presión y aumenta la vaporización; observaremos que el nivel del éter líquido se reduce. Si bajamos el tubo la presión de los vapores de éter aumenta y parte de los mismos se licuarán, aumentando el nivel del éter líquido, lo que corresponde a la tercera posición del tubo en la figura 116. En ambas operaciones sólo se produce una alteración del volumen, no variando ni la presión ni la temperatura del vapor al producirse el equilibrio entre líquido y vapor.

Producción de vapor

El vapor que se usa en la práctica suele no estar saturado sino *recalentado;* así se llama cuando está próximo al estado de saturación. Para producir vapor en gran escala se usan *calderas,* que no son otra cosa que recipientes metálicos que contienen el agua, la cual es calentada mediante la aplicación del calor suministrado por un combustible sólido, líquido o gaseoso. Si es sólido, hay que colocarlo sobre una parrilla para que el aire pase a través de los trozos. La figura 117 muestra el corte de una caldera típica a

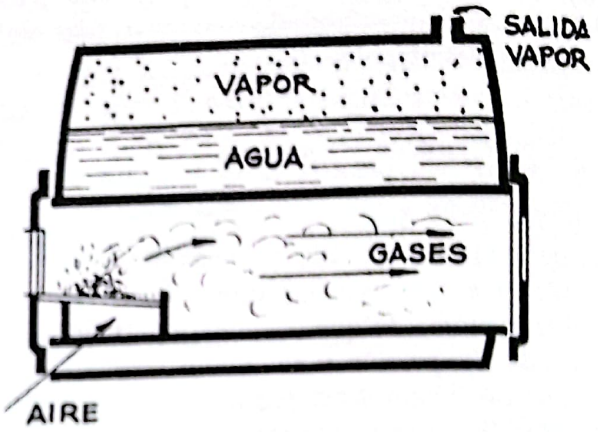


Fig. 117. – Corte de una caldera típica de hogar interno,

combustible sólido, de las utilizadas para sistemas de calefacción domiciliaria, que se llama de hogar interno. Las llamas calientan el agua y el vapor sale por un orificio superior mediante cañerías que lo distribuyen a los radiadores de calor. Allí se enfría, se condensa y una vez líquido (agua) vuelve a la caldera para seguir el ciclo.

Si el combustible es líquido, se lo vaporiza para encenderlo y las llamas calientan el piso de la caldera. Si es gaseoso, se enciende directamente y se aplica de la misma manera. Los gases de la combustión tienen que tener salida desde el recinto en que se halla la caldera hasta el exterior, lo que se hace mediante una chimenea.

Otras calderas son del tipo de tubos de fuego o son acuotubulares. Las de tubos de fuego tienen dentro de la masa de agua unos caños por los que se envían las llamas o gases calientes para calentar el agua. Las acuotubulares tienen el agua circulando por caños y las llamas o gases calientes lamen dichas cañerías. En ambos casos el contacto entre calor y agua es más directo por lo que mejora el rendimiento. Se usan para la gran industria, locomotoras, etc.

Humedad del aire

El aire de la atmósfera contiene habitualmente una cierta cantidad de vapor de agua. Esa cantidad, referida a un volumen de un metro cúbico, se llama *humedad absoluta,* y se mide en gramos por m^3; lógicamente, esa cifra no es ilustrativa en

el sentido popular. Pero si hablamos de la máxima cantidad de vapor de agua que puede contener el aire, máxima que se determina cuando al agregar un poco más de vapor se produce el comienzo de la condensación, ya podemos establecer cifras comprensibles. El aire admite entonces una cierta cantidad de vapor de agua, de humedad, según su temperatura y presión. Midiendo la cantidad de vapor de agua en gramos por m^3 que son necesarios para *saturarlo*, es decir que pasada esa cantidad comienza la condensación del vapor, se tiene la cifra máxima admisible de vapor. La relación entre la humedad absoluta y la máxima o de saturación se llama humedad relativa y se da en %. O sea que si la humedad absoluta o g/m^3 de vapor que hay en la atmósfera es h_a y la cantidad de g/m^3 que produce la saturación es h_s, la humedad relativa existente es:

$$h = \frac{h_a}{h_s} 100 \qquad (\%)$$

y esta es la cifra que dan los partes meteorológicos al informar que la humedad ambiente es del 40 %, por ejemplo. Claro que esa cifra se vincula con la temperatura y la presión atmosférica, pues cualquiera de éstas que varía, se alterará la humedad.

Para determinar el grado de humedad se usan los *higrómetros*, que son aparatos que tienen un elemento sensible a la humedad. Esa sensibilidad puede estar determinada por cambios de color, por estiramientos, por torsiones, etc. Son conocidas esas mascarillas de material plástico que contienen una sustancia sensible a la absorción de agua, la cual produce un cambio en la coloración de la misma (gallitos, pescados, etc.) y que nos indica si hay un grado de humedad alto, normal o bajo; claro, no hay cifras sino solamente orientación.

Los higrómetros capilares tienen un hilo de tripa que se estira al humedecerse, y ese movimiento se aprovecha para accionar una aguja que marca el % de humedad relativa. Otros tienen un aspecto similar al aparato de la figura 113, pero la espiral está envuelta en un paño higroscópico que provoca un acortamiento o un alargamiento de la lámina espiral, marcando en una escala directamente el % de humedad.

Un aparato o más preciso para determinar la humedad relativa es el *psicrómetro*, que se ilustra en la figura 118. Se trata de dos termómetros, a uno de cuyos bulbos se lo envuelve en un paño que se somete al goteo de agua: tendremos así un bulbo seco y uno húmedo. El termómetro de la izquierda marca la temperatura de bulbo seco T_1

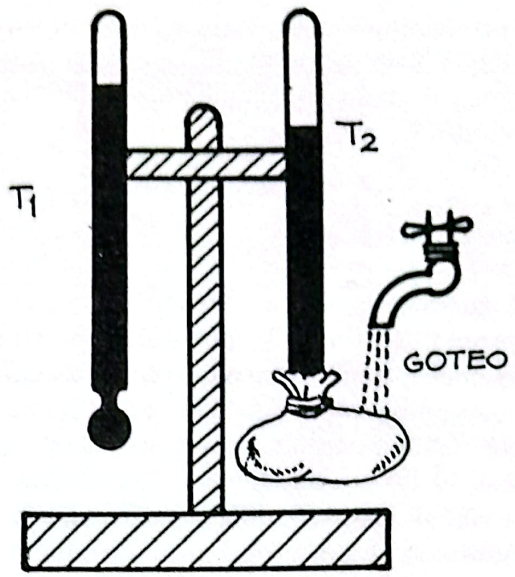


Fig. 118. – Disposición esquemática del psicrómetro para determinar el grado de humedad.

y el de la derecha la de bulbo húmedo T_2. La diferencia entre esas temperaturas se llevan a una tabla que viene con el aparato y que da directamente el % de humedad relativa del aire. La tabla adjunta es un trozo de las que se usan, ya que por su extensión no puede ser reproducida totalmente en este lugar.

% de humedad relativa dada por el psicrómetro

Temperatura del termómetro húmedo °C	*°C de diferencia de temperatura entre los termómetros*					
	0	2	4	6	8	10
0	100	64	36	14	–	–
5	100	71	48	30	16	5
10	100	76	57	41	29	18
15	100	80	63	49	38	29
20	100	82	68	55	45	36

Otros aparatos, llamados *higrometros de condensación*, determinan la temperatura que tendría el aire para quedar saturado con la cantidad de vapor de agua que contiene. Tal temperatura se llama *punto de rocío* y es, lógicamente, inferior a la temperatura ambiente, pues el aire no está saturado y para que ello ocurra hay que enfriarlo hasta que comience la condensación. Cuando la temperatura del aire desciende hasta el punto de rocío, los objetos se cubren de una delgada película de condensación y se dice que se empañan.

Los higrómetros de condensación hacen pasar una corriente de aire por un depósito de éter; la temperatura del líquido baja hasta que se empaña una placa metálica que tiene en el frente del

vaso. En ese momento se toma la temperatura del interior y es el punto de rocío. Hay tablas que dan la humedad ambiente partiendo del punto de rocío.

Transmisión del calor

Los cuerpos en general tienen su estado térmico propio, determinado por las temperaturas a que se encuentran, su masa y calor específico, según conceptos ya vistos. Pero cada cuerpo puede tener distinta cantidad de calor e igual temperatura, o, lo que es más general, las temperaturas serán todas distintas. También puede suceder que en un mismo cuerpo se tengan temperaturas diferentes en zonas cercanas o lejanas de su masa.

Basta que haya una pequeña diferencia de temperatura entre dos zonas de un cuerpo para que se establezca una transmisión de calor, desde la parte más caliente a la más fría, transmisión que sólo cesará cuando se han nivelado las temperaturas.

Pero no es necesario que las diferencias de temperaturas estén en el mismo cuerpo para que se produzca la transmisión, pues si colocamos dos cuerpos en contacto, o separados por un fluido, o alejados, siempre que uno de ellos esté a mayor temperatura que el otro, se producirá una transmisión del calor desde el primero hacia el segundo.

Se distinguen tres formas de realizarse la transmisión de calor: por *conducción*, por *convección* y por *radiación*. La transmisión por conducción se establece a través de la masa misma del cuerpo o de dos cuerpos en contacto íntimo. Así, si tomamos una barra (figura 119) y calentamos un

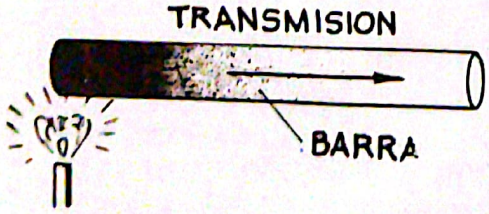


Fig. 119. – Transmisión del calor por conducción.

extremo, elevaremos la temperatura en ese lugar, que se hará mayor que la del otro extremo y se iniciará una transmisión de calor hacia el extremo frío. Esto se puede comprobar fácilmente. El calor se propaga a lo largo de la barra en la dirección señalada por la flecha y si se tocan varios puntos intermedios se notará que la temperatura va decreciendo hacia el extremo frío. Si dejamos de calentar la barra, lentamente se nivelará la temperatura de toda su masa.

La transmisión por convección se lleva a cabo por medio de los fluidos que rodean a los cuerpos, debida al movimiento de sus moléculas. Este movimiento se produce siempre, aunque estén en reposo, porque al calentarse las moléculas próximas a la superficie caliente, se desplazan alejándose y moléculas frías ocupan su lugar. Supongamos un tubo o caño (figura 120), dentro del cual circula vapor de agua. Alrededor del caño

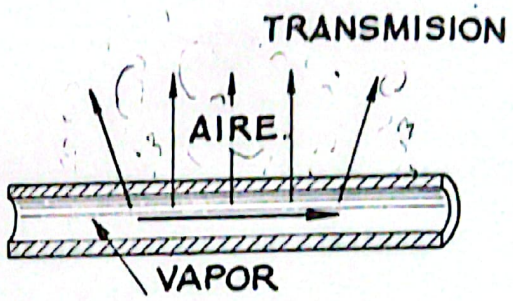


Fig. 120. Transmisión del calor por convección.

hay aire en reposo; la temperatura del vapor es mayor que la del aire, lo que debe dar lugar a una transmisión de calor. Al circular el vapor caliente por el tubo, sus moléculas van rozando las paredes internas del mismo, lo que origina una transmisión del calor desde el vapor hacia las paredes del tubo, transmisión que, de acuerdo con lo visto, se cumple por convección. Cuando las paredes internas del tubo están a mayor temperatura que las externas, se transmite calor desde adentro hacia afuera, por conducción a través de la masa del caño. Pero una vez que las paredes externas del tubo se calientan, comienzan a calentarse también las moléculas del aire en contacto con dichas paredes. Esas moléculas se separan del tubo y otras frías ocupan su lugar, calentándose a su vez y así sucesivamente. El calor que proviene del vapor se transmite por convección a las paredes del tubo, por conducción a través del mismo y por convección nuevamente desde el tubo hacia afuera, mediante el aire que lo rodea. No es necesario que los flúidos interno y externo sean gases, pues el proceso se cumple idénticamente con líquidos, como es el caso de los refrigerados y los precalentadores, en los que por una tubería circula líquido o vapor para calentar o enfriar al líquido que envuelve a la tubería.

La transmisión por radiación es un poco más compleja, pues en su explicación intervienen elementos de los nuevos conceptos de la Física, referentes a la estructura del calor, las ondas térmicas y la irradiación de energía. Pero simplemente, si imaginamos un cuerpo que está a elevada temperatura (ver figura 121) y cerca o lejos

de él hay otro que está frío, el segundo recibe calor del primero por radiación. No se piense que se debe tratar de una transmisión por convección a través del aire que hay entre los dos objetos,

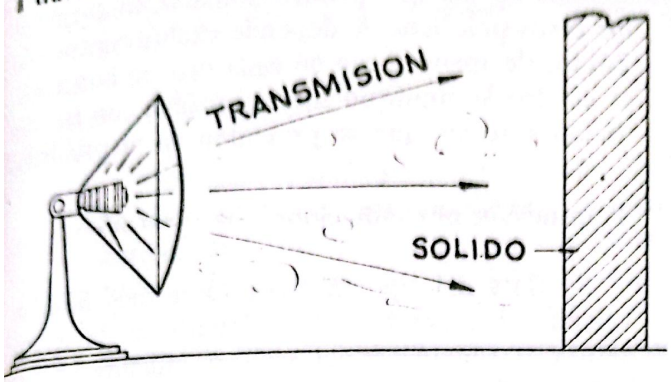


Fig. 121. Transmisión del calor por radiación.

cosa que se cumple en pequeña escala, porque la mayor parte del calor se irradia. Para eliminar la posibilidad de confundir esta transmisión con la convección, piénsese en el calor del sol que recibimos en nuestro planeta exclusivamente por radiación. Si el calor solar se transmitiera por conducción o por convección, no habría gran diferencia de temperatura en lugares expuestos a sus rayos o a la sombra. Pero la temperatura menor que hay en los lugares a la sombra, se explica porque una vez que el aire está caliente, transmite por conducción y convección el calor al aire que no está expuesto a los rayos solares. Estos motivos han hecho que a las estufas (figura 121) se les dé forma de reflector, para aumentar la transmisión por radiación, pues esa forma no tendría influencia en la transmisión por conducción o por convección

Transmisión por conducción

Sabemos que la transmisión por conducción o por conductibilidad térmica de los cuerpos se realiza a través de la masa de los mismos. Supongamos un cuerpo como el ilustrado en la figura 122; es un trozo de placa, de pared o de cualquier otro cuerpo de caras planas, cuya distancia entre las mismas es e (espesor e, en metros). La superficie de las caras es S, en m^2. Una de las caras está a una temperatura t_1 mayor que la de la otra cara t_2. Mientras se mantenga t_1 mayor que t_2 se producirá la transmisión de calor desde la cara caliente hacia la cara fría, a través de la placa.

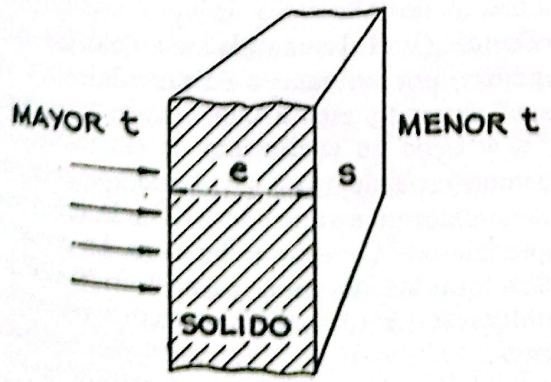


Fig. 122. – Proceso de la transmisión del calor por conducción.

Es evidente que cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre las caras y mayor la superficie de las mismas, mayor será la cantidad de calor transmitida por hora desde una cara hacia la otra. También se entiende fácilmente que el grosor de la placa obstaculiza la transmisión, es decir que cuanto más espesor tenga menor será la cantidad de calor transmitida. Luego, la cantidad de Calorías transmitida por hora desde una cara hacia la otra valdrá:

$$Q = \frac{k S (t_1 - t_2)}{e}$$

Donde k es el coeficiente de conductibilidad térmica, que contempla las características de la substancia que forma la placa, o sea la aptitud de la misma para conducir el calor. La superficie S se toma en m^2 y el espesor e en m. Las temperaturas fría y caliente en °C.

Los coeficientes de conductibilidad térmica de los materiales más usuales se dan en la tabla adjunta y su interpretación es la siguiente: k es el número de Calorías que se transmite a través de la substancia considerada, en una hora, cuando hay 1°C de diferencia de temperatura entre sus caras, cuando la superficie de las mismas es de 1 m^2 y el espesor de la placa es de 1 m.

Coeficientes de conductibilidad térmica

Substancia	k
Aceite	0,12
Agua	0,78
Aire quieto	0,06
Aluminio	175,00
Amianto	0,19
Cobre	320,00
Hierro	55,00
Hormigón	0,65
Ladrillo	0,35
Madera	0,13
Mármol	2,50
Plomo	30,00
Vidrio	0,60
Zinc	95,00

Transmisión por convección

Este tipo de transmisión es de muy difícil apreciación debido a la cantidad de factores que intervienen, así como la conductibilidad, densidad, calor específico, viscosidad y velocidad del flúido que toma el calor de la superficie caliente o se la entrega. Los coeficientes que intervienen en el cálculo son de muy insegura asignación, debiendo procederse con cautela. Para los casos prácticos es preferible tomar algunos modelos típicos, con la salvedad que no se puede extender la consideración de cada uno de ellos a otros similares, si las condiciones no son idénticas.

Supongamos una cara de un cuerpo sólido (figura 123) que está a una cierta temperatura t_1

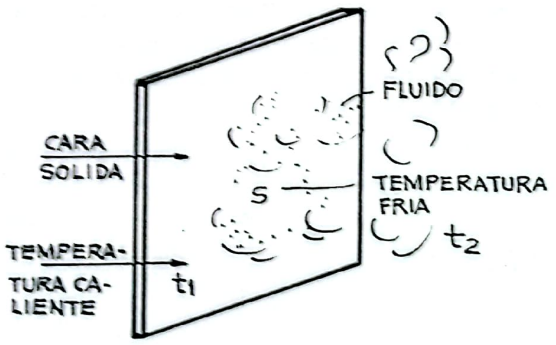


Fig. 123. – Proceso de la transmisión del calor por convección.

en °C y que tiene una superficie S en m^2. La cantidad de Calorías que la pared cederá al fluido circundante, por hora, está dada por:

$$Q = K S (t_1 - t_2)$$

Donde K es el coeficiente de transmisión por convección, o sea la cantidad de Calorías que cede la pared al fluido por hora, cuando la superficie es de 1 m^2 y la pared tiene 1°C más de temperatura que el fluido. Los valores de este coeficiente no son estables, dándose en el cuadro algunos de los que pueden tomarse en cuenta en los casos prácticos. K depende exclusivamente del flúido, de manera que en cada caso se buscará en el cuadro la similitud mayor posible con las condiciones reales que se presenten en el problema.

Valores del coeficiente de convección

Flúido y condiciones de la transmisión	*K*
Agua en ebullición en buena circulación .	2000 a 5000
Agua caliente, en reposo	500
Aire en reposo, para diferencia de temperaturas de 10° C	3 a 4
Aire en reposo, para diferencia de temperaturas de 100° C	5 a 7
Aire en reposo, para diferencia de temperaturas mayores de 100° C	7 a 10
Aire rodeando a tubos calientes, con exceso de temperatura de 10° C	
Aire que enfría a un cilindro que gira con velocidad periférica comprendida entre 0 y 30 m/seg.	2 a 15

Transmisión por radiación

Se trata del tipo de transmisión más difícil de calcular y depende principalmente de la temperatura y superficie del cuerpo radiante. No es posible determinar cuál es la cantidad de calor que absorberá un cuerpo colocado a cierta distancia del cuerpo radiante, pues la irradiación se cumple en todas direcciones y absorberán además del cuerpo que estamos considerando, todos los demás comprendidos en la zona circundante.

Lo único que se puede apreciar en forma muy insegura, es la cantidad de calor irradiado por hora, en relación con la temperatura y superficie del cuerpo radiante. Esa cantidad de calor es proporcional a la superficie, a un coeficiente de radiación que contempla las condiciones de la superficie exterior del cuerpo y a la cuarta potencia de la *temperatura absoluta* del cuerpo, que sabemos se mide en °K.

Es evidente que el coeficiente de radiación sólo debe contemplar la superficie exterior del cuerpo radiante, interesando si es mate, brillante, pulida, clara u obscura, pues esos son los factores que facilitan o impiden este tipo de transmisión. Tal coeficiente varía entre 1,0 para cuerpos muy pulidos y brillantes y 4,5 para cuerpos opacos y obscuros. El cálculo de la cantidad de calor irradiada por hora se puede hacer con la fórmula de Stefan-Boltzmann:

$$Q = C S (0{,}01\ T)^4$$

Donde Q es la cantidad de Calorías radiada por hora, por un cuerpo de superficie caliente S, en m^2, cuando está a una temperatura absoluta T °K y tiene un coeficiente de radiación C, que sabemos varía de 1,0 a 4,5. La temperatura absoluta se determina sumando 273° a la temperatura expresada en °C, según se ha visto. La potencia 4 indica que la centésima parte de la temperatura absoluta se debe multiplicar cuatro veces por sí misma.

Día 11

En esta segunda parte del estudio del calor trataremos sus aplicaciones, lo que se ha dado en llamar Termodinámica, si bien algunos de los temas tratados en el capítulo anterior son, en rigor, partes de esta rama de la Física. Como lo importante es estudiar todo y las agrupaciones de temas admiten variantes impuestas por diversas razones, dejamos de lado la cuestión. El calor es transformable en otras manifestaciones de la energía y con él podemos producir movimientos, como en las locomotoras y motores térmicos para vehículos; también podemos producir frío, es decir, quitar calor a los cuerpos mediante los refrigeradores. Esos y otros temas conexos serán abordados en la jornada que ahora iniciamos, con la recomendación al lector de que revea aunque sea brevemente los temas del capítulo anterior, pues tendrá que tenerlos presente.

APLICACIONES DEL CALOR–TERMODINAMICA

El calor es una fuente de energía y como tal se la aprovecha para numerosas aplicaciones de la vida y de la industria. La energía térmica acciona motores de combustión que mueven millones de vehículos, arrastra generadores de grandes usinas que dan energía eléctrica a todo el mundo, permite la cocción de nuestros alimentos y enfría los que guardamos para conservarlos; esta última aseveración deberá ser aclarada oportunamente.

Propiedades de gases y vapores

La Técnica utiliza los gases y vapores en diversas aplicaciones, o, extendiendo más la generalidad aludida, los flúidos, sean ellos líquidos o gaseosos. Encontramos las máquinas de vapor, los motores térmicos, las turbinas de vapor o de agua y una cantidad de máquinas, motores o mecanismos que emplean en su funcionamiento diversos flúidos en movimiento. El estudio particular de las condiciones en que se aprovechan las propiedades de los mismos constituye la Termodinámica.

Para que entre en la definición, ese flúido debe ser transformado, es decir sufrir algún cambio en sus características. Es de importancia fundamental la temperatura, pues alrededor de ella están las demás características, ligadas siempre por relaciones más o menos conocidas.

Para realizar un somero estudio de las transformaciones de los flúidos y del resultado que de ello puede obtenerse, deben conocerse las magnitudes que entran en juego. Así tenemos en primer lugar la *temperatura*, la *presión* y el *volumen* como magnitudes fundamentales, la *energía*, el *calor* y la *entropía*, como magnitudes o características derivadas. Fuera de estas fundamentales, se encuentran otras que guardan con las antecichas relaciones o dependencias ocasionales.

La temperatura ya ha sido definida en el capítulo anterior; sabemos que es la manifestación del nivel térmico del cuerpo y que se mide en grados Centígrados, comúnmente, o en grados Kelvin, si se desea hablar de temperatura absoluta, referida a cantidades que sólo pueden ser positivas. Es decir que midiéndola en °C se pueden tener cantidades positivas (sobre cero) o negativas (bajo cero), pero si se le suman 273° a la temperatura centígrada obtenemos la absoluta, que ya no puede ser negativa, pues el cero Kelvin es la mínima temperatura concebible.

La *presión* se define como la fuerza que actúa sobre la unidad de superficie. Si suponemos una placa horizontal y sobre ella una pila de arena, de forma prismática, podemos definir la presión que actúa sobre la placa como el cociente entre el peso de toda la arena y la superficie de la placa. Si la arena pesa 600 Kg y la placa tiene una superficie de 150 cm^2, la *presión* que actúa sobre ésta es de: 600/150 = 4 Kg/cm^2.

Con lo dicho queda definida la presión y especificada la forma de calcularla, pues basta dividir la fuerza o peso total que actúa sobre una superficie por el valor de esa superficie, para obtener la presión.

El *volumen* ya es conocido y referido a los flúidos puede tomarse en litros o en metros cúbicos, sabiéndose que entre una y otra unidad hay un factor 1.000, de acuerdo con la Geometría. En los gases y vapores el volumen es el del recipiente que los contine, ya que se expanden permanentemente para ocupar el mayor espacio posible.

La *energía* que contiene un flúido es su capacidad de producir trabajo, es decir que si tenemos vapor de agua y de él podemos extraer trabajo, podemos accionar a una máquina; toda la cantidad de trabajo que se realice es equivalente a la energía que poseía el vapor. Después de utilizado habrá cambiado alguna o varias de sus características fundamentales, como veremos.

Siendo la energía un trabajo almacenado, se debe medir en su misma unidad, que sabemos es el Kilográmetro, resultado obtenido al multiplicar la fuerza en Kg por la distancia recorrida en metros (ver capítulo 6).

El *calor* o cantidad de calor que contiene un flúido, similarmente a lo que se definió para los cuerpos en general, es la energía térmica disponible. Entre el calor y la energía debe haber una relación numérica, puesto que ambas magnitudes coinciden en su concepto. En los *principios fundamentales de la termodinámica* se verá ese factor numérico de conversión.

La *entropía* es de más difícil concepción mecánica o física, pues se refiere a los cambios de estado de los flúidos y relaciona la variación de la cantidad de calor con la temperatura absoluta. Con cierta reserva, puede decirse que la entropía está dada por el cociente entre la cantidad de calor y la temperatura absoluta:

$$E = \frac{Q}{T}$$

Donde E es la entropía, Q la cantidad de calor en Calorías y T la temperatura en °K. Tal relación se aplica a las variaciones o cambios (ciclos). Para aclarar su concepto diremos que si un flúido sufre transformaciones sin que se altere la cantidad de calor que contiene, ni su temperatura, la entropía permanece constante. Tal transformación se llama *adiabática.* Si sólo permanece constante la temperatura, se llama *isotérmica.* Si lo que permanece constante es la presión, la transformación toma el nombre de *isobárica.* También se encuentran las transformaciones a volumen constante, que se realizarán en recipientes cerrados, no elásticos. En todos los casos, las magnitudes que se modifican lo hacen siguiendo leyes conocidas y guardando entre sí las relaciones fijas, de carácter lineal o no, según el caso. La Termodinámica estudia precisamente esas variaciones en particular y su aprovechamiento en la práctica, para producir o absorber trabajo útil. Todas las máquinas y motores térmicos emplean en su funcionamiento una o varias de las transformaciones definidas.

Principios fundamentales de la Termodinámica

Las dos leyes fundamentales se refieren a las transformaciones de calor en trabajo, expresando la primera la equivalencia de unidades y la segunda la posiblidad de tal tranformación. El *pirmer principio* dice que hay una equivalencia numérica fija entre la cantidad de calor y el trabajo mecánico, y que vale:

1 Caloría = 427 Kilográmetros

Entendiéndose que se toma la Caloría como la cantidad de calor necesaria para elevar en 1°C la temperatura de 1 litro de agua. Tal cifra, 427, se llama equivalente mecánico del calor, y su inversa, equivalente térmico del trabajo (1/427).

El *segundo principio* dice que si un sistema de flúidos o cuerpos están a la misma temperatura, no se puede desarrollar trabajo sin la intervención de agentes externos. Quiere decir que para que se pueda desarrollar trabajo es necesario que haya disponible una diferencia de temperatura. Este principio guarda una relación marcada con el enunciado de Clausius, que dice que no es posible que un cuerpo más frío entregue calor a otro más caliente, sin la intervención de un agente externo.

En resumen, puede relizarse un trabajo mecánico con la intervención de un flúido, pero es menester que se disponga de una temperatura mayor al comienzo de la operación, resultando una temperatura menor al final de la misma. Si extraemos trabajo, el cuerpo caliente entrega calor al frío. Si en cambio, gastamos trabajo, el cuerpo frío puede entregar calor al caliente. El primer caso es típico de los motores térmicos y el segundo de las máquinas frigoríficas, pues en aquellos se obtiene trabajo y en estas últimas hay que gastarlo.

Leyes para los gases perfectos

Hay tres leyes fundamentales que dan las relaciones entre las magnitudes fundamentales, volumen, presión y temperatura y que son válidas para los gases perfectos. En la práctica estas le-

yes se aplican a los gases reales y a los vapores, pero con restricciones, para tener en cuenta su relativa inexactitud. Las tres leyes son la de Boyle-Mariotte, la de Gay-Lussac y la de Clapeyron. Para definirlas, imaginemos un recipiente cilíndrico (figura 124) con un émbolo que presiona sobre un gas contenido en aquel. Sobre el pistón hay un peso P que provoca una presión dada por el cociente entre P y la superficie de la cara inferior del pistón, de acuerdo con la definición de presión. Llamemos p a esa presión y coloquemos 1 Kg de gas dentro del cilindro, de modo que el volumen que ocupe será lo que se define por *volumen específico* o volumen de la unidad de peso. La temperatura del gas la mediremos en °K, es decir, consideraremos la temperatura absoluta (igual a la centígrada, sumándole 273°).

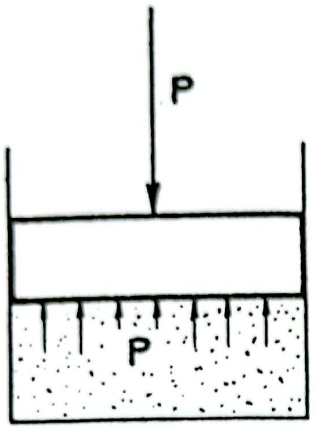


Fig. 124. – Dispositivo para definir las leyes de los gases.

Resumiendo, p es la presión que ejerce el gas sobre el cilindro o el émbolo sobre el gas y se mide en Kg/cm² para ciertas aplicaciones técnicas, y en Kg/m² para otras aplicaciones. En este caso la tomaremos en Kg/m². Al volumen específico, o volumen que nos ocupa un Kg de gas, lo llamamos v, medido en m³. Y la temperatura absoluta o cantidad de grados Kelvin la designamos T. Con estas magnitudes definiremos las tres leyes mencionadas.

La ley de *Boyle-Mariotte* dice que a temperatura constante, las presiones son inversamente proporcionales a los volúmenes específicos. Quiere decir que si ejercemos una presión p_1, el gas ocupará un volumen v_1 y que si cambiamos la presión a otra p_2, el volumen cambiará a otro v_2 y entre esas magnitudes se cumple la siguiente proporción:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

Es decir que a mayor presión menor volumen y viceversa, pero siguiendo una proporción aritmética.

Esta ley puede expresarse también en otra forma, con sólo suponer que se parte de una presión y volumen unitarios. En efecto, si en la expresión anterior resulta que una de las presiones y su correspondiente volumen lo tomamos como referencia se obtiene:

$$p\,v = \text{constante}$$

Aclarando que estas relaciones y proporciones son válidas si la temperatura se mantiene constante, pues tal es la condición de validez de la ley de Boyle-Mariotte.

La ley de *Gay-Lussac* dice que a presión constante, las temperaturas absolutas son proporcionales a los volúmenes específicos. Para visualizar esto, imaginemos que colocamos un peso sobre el pistón y le dejamos libre juego. Cualquiera que sea el volumen del gas, el peso subirá o bajará, pero la presión se mantendrá constante, de acuerdo con la definición de presión.

Calentando o enfriando el gas variará su volumen en forma proporcional, y si tenemos que a una temperatura T_1 el volumen específico es v_1 y a una temperatura T_2 el volumen es v_2, entre esas cantidades se cumple la siguiente proporción directa:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Ecuación válida para los casos en que la presión se mantenga constante. Los volúmenes son específicos, es decir de 1 Kg de gas, pero en nuestro ejemplo se cumple tal condición porque colocamos un Kg de gas en el cilindro. En la práctica se refiere al volumen total tomando el peso total y haciendo el cociente respectivo del primero por el segundo, resultando siempre m³/Kg. Las temperaturas absolutas se obtienen sumando 273° a la temperatura centígrada.

La ley de *Clapeyron* se refiere a los cambios de estado, y contiene todas las magnitudes fundamentales, resumiendo, además, las dos leyes anteriores. Se la expresa en la siguiente forma:

$$p\,v = R\,T$$

Donde p es la presión del gas perfecto, v su volumen específico y T la temperatura absoluta. R es una constante, llamada constante universal de los gases, y sus valores para los casos corrientes están dados en tablas.

Para el aire $R = 29{,}27$ y para el vapor de agua $R = 47{,}06$.

Cambios de estado de gases y vapores

Hemos dicho en el párrafo de aplicaciones del calor que había cuatro cambios de estado típicos, que llamamos transformaciones de los gases. Esos cuatro cambios eran: a entropía constante, a temperatura constante, a presión constante y a volumen constante. De acuerdo con las leyes de la Termodinámica, sabemos en qué condiciones se realizan esos cambios de estado. Veamos las representaciones gráficas de tales cuatro casos particulares:

En primer lugar consideremos el cambio a presión constante, o transformación *isobárica*. Si trazamos un diagrama de presiones en función de los volúmenes, lo que se llama *gráfico de compresión o expansión,* tendremos dos ejes de coordenadas según figura 125. En el eje horizontal se toman en escala los volúmenes específicos del gas o vapor y en el eje vertical tomaremos las presiones. Estamos frente a una transformación de gas que no sufre variación de presión, luego el gráfico debe dar una recta paralela al eje horizontal, para que la presión p tenga siempre el mismo valor. Los cambios de volumen se realizan por variación de la temperatura, siguiendo la ley de Gay-Laussac. Como en el gráfico no aparecen las temperaturas, no hay variación alguna a representar que no sea el volumen que cambia según una ley lineal, o sea en línea recta. La expansión o compresión se hace calentando o enfriando el gas sin variar la presión.

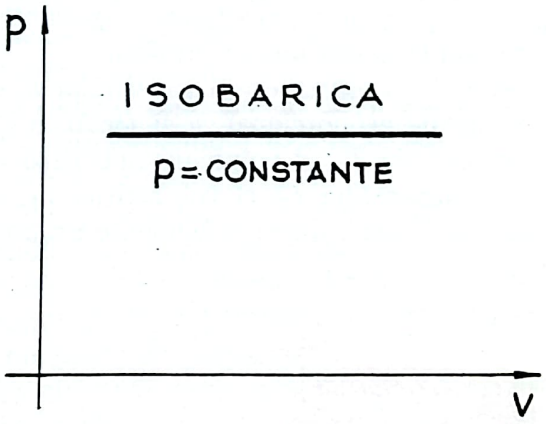


Fig. 125. – Cambios de volumen a presión constante.

Supongamos ahora que tenemos un recipiente de volumen invariable, y calentamos o enfriamos el gas contenido en él. No habrá variación de volumen pero sí de presiones, según la misma ley. Calentando el gas se elevará la presión y enfriándolo se reducirá. El volumen permanece invariable, pues se trata de una transformación a *volumen constante*. La representación gráfica de tal cambio de estado en el diagrama de presiones y volúmenes debe ser una recta vertical (figura 126) puesto que v se mantiene constante.

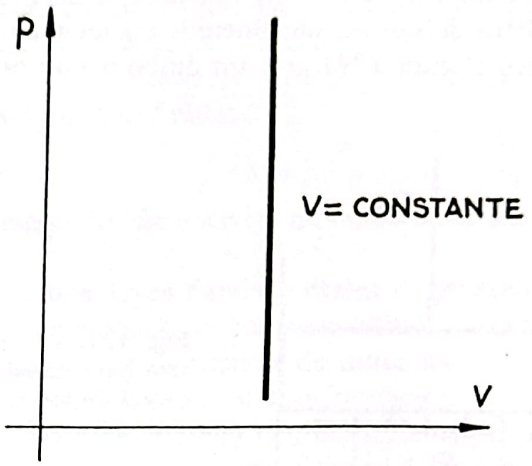


Fig. 126. – Cambios de presión a volumen constante.

Veamos ahora cómo se producen las variaciones a temperatura constante, o *isotermas*. Para ello hacemos variar el volumen del gas, por ejemplo, empleando el dispositivo de la figura 124, y si se hace mantener la temperatura mediante enfriamiento o calentamiento, según el caso, se producirá una variación proporcional de la presión, siguiendo la ley de Boyle-Mariotte y la de Gay-Lussac. En cualquiera de ellas se ve que el producto de la presión por el volumen específico es constante si la temperatura no se altera. La representación gráfica de esta transformación es una hipérbola equilátera, como se ve en la figura 127. Haciendo el producto de la abscisa por la ordenada para cualquier punto de la curva, da el mismo valor. Quiere decir que la isoterma representada gráficamente da una hipérbola como la ilustrada.

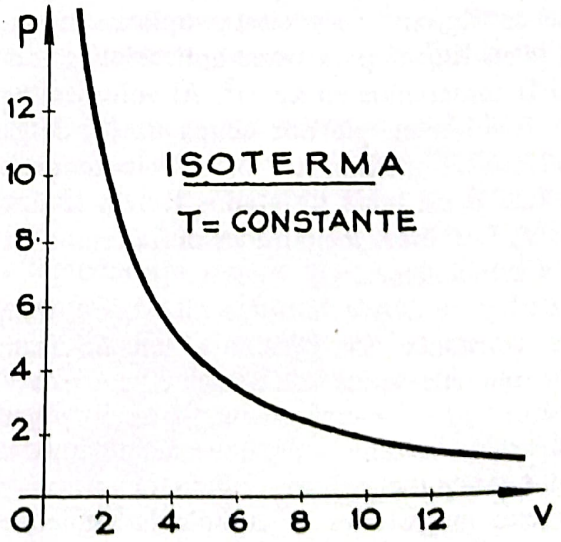


Fig. 127. – Cambios de volúmenes y presiones a temperatura constante.

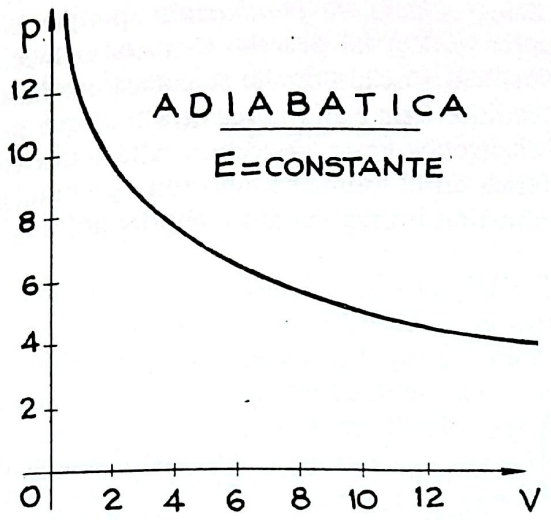


Fig. 128. – Cambio de volúmenes y presiones a entropía constante.

Consideramos finalmente el caso de una transformación que se realice sin intercambio de calor con el exterior, esto es, sin tomar ni ceder calor al medio que rodea el recipiente que contiene el gas o vapor. Sabemos que tal transformación se llama *adiabática,* o a entropía constante, porque al no haber variación de la cantidad total de calor contenida en el gas la expresión de la entropía no se altera en su valor.

Las curvas de entropía constante resultan un poco más complejas que las tres anteriores, pues resulta el volumen específico elevado a un exponente fraccionario. Por medio de desarrollos matemáticos se llega a la expresión siguiente:

$$p\, v^{0,4} = \text{constante}$$

que es válida para los gases diatómicos. El exponente cambia de valor para otros gases y vapores, lo que modifica ligeramente la forma de la curva de representación gráfica comparada con la hipérbola ya vista. Cabe hacer notar que al exponente fraccionario 0,4 equivale a extraer la raíz quinta del cuadrado de v.

Tomando los ejes de coordenadas con la presión y el volumen específico y dando valores a ambas cantidades resultan curvas como la de la figura 128 que guardan cierta similitud con las isotermas, pero son menos inclinadas. Las adiabáticas tienen esta característica, es decir, las variaciones de presión son menos importantes que las de volumen.

En el estudio del funcionamiento de los motores térmicos, compresores, etc., se utilizan los diagramas de transformación ya vistos, resultando que en cada máquina se produce una serie de variaciones, dando siempre una figura cerrada que se llama ciclo. Por ejemplo, en los motores térmicos el ciclo está formado por dos adiabáticas y dos líneas de volumen constante, como veremos de inmediato.

Motores térmicos.

Una de las aplicaciones más importantes del calor, es una transformación de energía térmica en mecánica que se obtiene produciendo la combustión de un gas inflamable dentro de una cámara cerrada. La presión originada hace mover una pieza móvil de esa cámara y ese movimiento rectilíneo se transforma en rotativo, usándose para mover un vehículo o producir otra clase de trabajo mecánico. Tal es en esencia el motor térmico o de combustión interna que describiremos en su fase constructiva y en su funcionamiento. Adelantamos que según la presión interior y el tipo de combustible usado esos motores pueden ser de gas, de nafta o diesel, denominaciones ya generalizadas. Los de nafta también suelen llamarse a *explosión*, aunque esta palabra no se ajuste a una verdad física.

Describiremos primero un motor típico, aunque algo generalizado, para pasar más adelante a dar los detalles que los diferencian, según la clasificación hecha anteriormente.

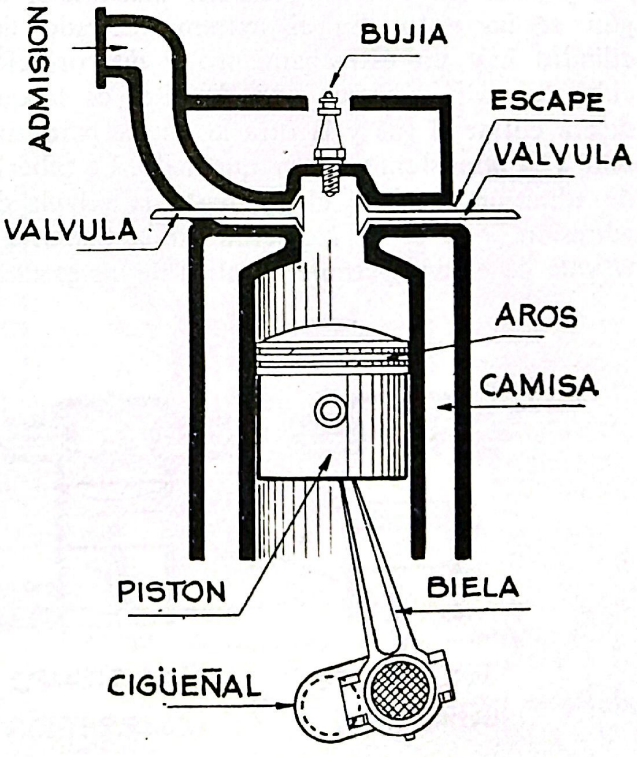


Fig. 129. – Corte esquemático de un motor térmico.

La figura 129 muestra un corte esquemático de un motor térmico monocilíndrico, que consiste en un cilindro dentro del cual puede moverse un pistón o émbolo, el cual tiene un eje transversal articulado que sujeta a una barra o biela. Esta última articula con un eje acodado o cigüeñal, de modo que al subir o bajar el pistón, el cigüeñal gira. Para imaginar la forma de ese cigüeñal, la figura 130 nos muestra uno correspondiente a un motor de seis cilindros. En el extremo de la izquierda se ve el disco de acoplamiento a la polea que adquiere así un movimiento rotativo. El cilindro está forrado con dobles paredes, entre las cuales circula agua de enfriamiento, a efecto de mantener la temperatura dentro de los límites compatibles con el funcionamiento. En tales condiciones, esta camisa de refrigeración se encarga de limitar la temperatura, haciendo que toda transformación de presiones y volúmenes sea de carácter adiabático, según se ha visto. En el extremo cerrado del cilindro hay un estrechamiento y dos orificios cubiertos con válvulas; una de ellas es la que dejará entrar el gas y la otra la que le permitirá salir a la atmósfera una vez quemado. La tubería de admisión conduce al gas hasta la válvula de admisión, que es la izquierda en la figura. La válvula de escape permite la salida de los gases al aire libre y en la figura es la derecha. En el extremo de la parte estrechada del cilindro, que se llama *cámara de combustión*, porque en ese lugar se realiza tal proceso térmico, se encuentra un orificio roscado donde se coloca una bujía de encendido. Esta bujía no es otra cosa que un par de electrodos entre los cuales saltará una chispa eléctrica en el momento oportuno y producirá la combustión brusca del gas comprimido.

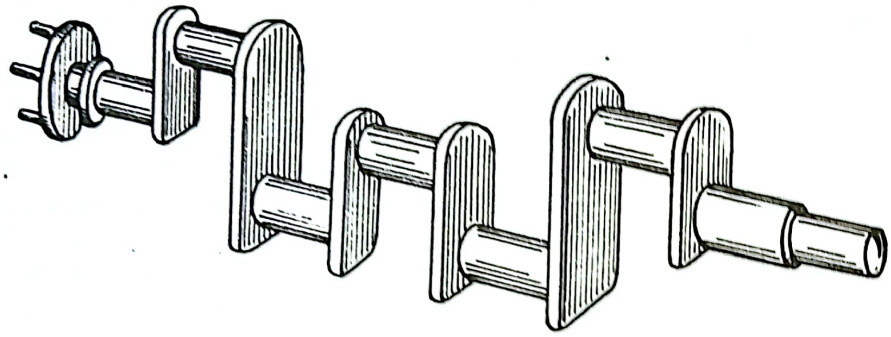


Fig. 130. - Aspecto del cigüeñal de un motor de seis cilindros.

Funcionamiento del motor de cuatro tiempos

El motor que estamos describiendo se llama de cuatro tiempos y esto porque un ciclo completo del funcionamiento se realiza en cuatro carreras del pistón. Veamos qué sucede en cada una de ellas:

En la figura 131 se ilustra esquemáticamente lo que sucede en cada tiempo o carrera. Se notan las válvulas, cuándo se abren y cuál está abierta o cerrada. Se indica también la dirección del movimiento del pistón:

1er. tiempo: Admisión. El pistón aspira los gases que entran por la válvula izquierda debido al efecto de succión que produce el pistón en el cilindro. Durante toda la carrera siguen entrando gases hasta llenar al cilindro. La válvula de admisión ha sido abierta por una leva acoplada al eje motor y con el ángulo conveniente.

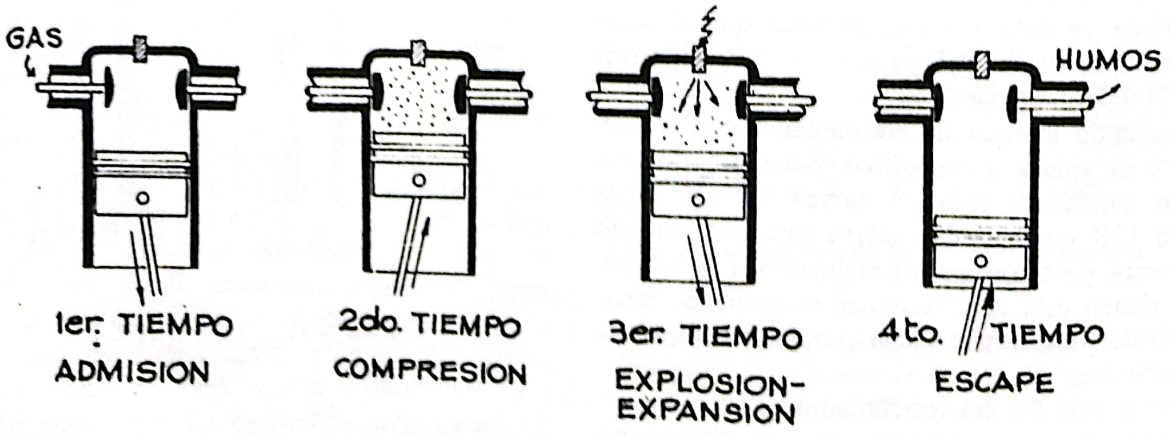


Fig. 131. - Proceso de funcionamiento del motor de cuatro tiempos.

2° tiempo: Compresión. El pistón camina hacia arriba y comprime los gases que están dentro del cilindro, pues la válvula de admisión ya está cerrada. La temperatura se elevaría mucho si no existiera la camisa de agua de refrigeración. La transformación que sufre el gas es adiabática, pues no hay intercambio de calor con el exterior. Durante toda esta carrera o tiempo las dos válvulas están cerradas.

3er. tiempo: Expansión. Cuando el pistón llegó al punto muerto superior o límite de su carrera se produce una chispa en la bujía por medios eléctricos, y se origina la combustión espontánea de la mezcla gaseosa comprimida, dando origen a una brusca elevación de la presión que empuja al pistón hacia abajo. Este proceso, se suele denominar *explosión,* aunque no es tal cosa lo que sucede, sino más bien una combustión brusca provocada por la chispa. Las dos válvulas continúan cerradas.

4° tiempo: Escape. Se abre en ese momento la válvula de escape que es la derecha, accionada por una leva y el pistón comienza su cuarta carrera y segunda hacia arriba, impulsando a los gases que ya se han quemado a salir por la válvula de escape hacia el exterior. Al final de la carrera de escape se cierra esa válvula y se abre la de admisión, pues comienza enseguida el primer tiempo del ciclo subsiguiente.

Para abrir y cerrar las válvulas de admisión y escape se usan levas accionadas por el mismo eje del motor, según la ilustración esquemática de la figura 132. Un resorte mantiene a la válvula ob-

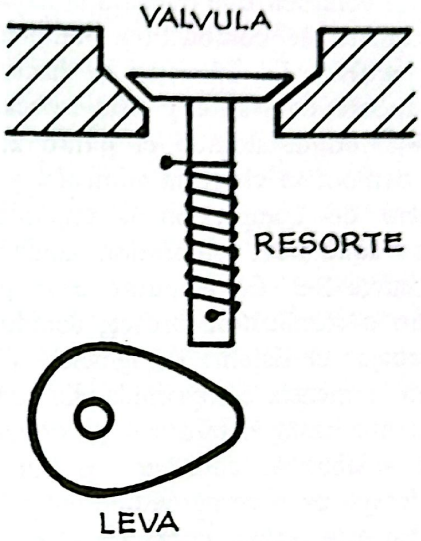


Fig. 132. - Forma como la leva gobierna la válvula.

turando el conducto de entrada o salida de gas, y cuando la pieza excéntrica gira, su saliente empuja al eje de la válvula, forzándola y abriendo el conducto, una vez por cada vuelta de dicha leva. Si el motor es multicilíndrico, habrá dos levas por cada cilindro, una para la válvula de admisión y otra para la de escape de cada cilin-

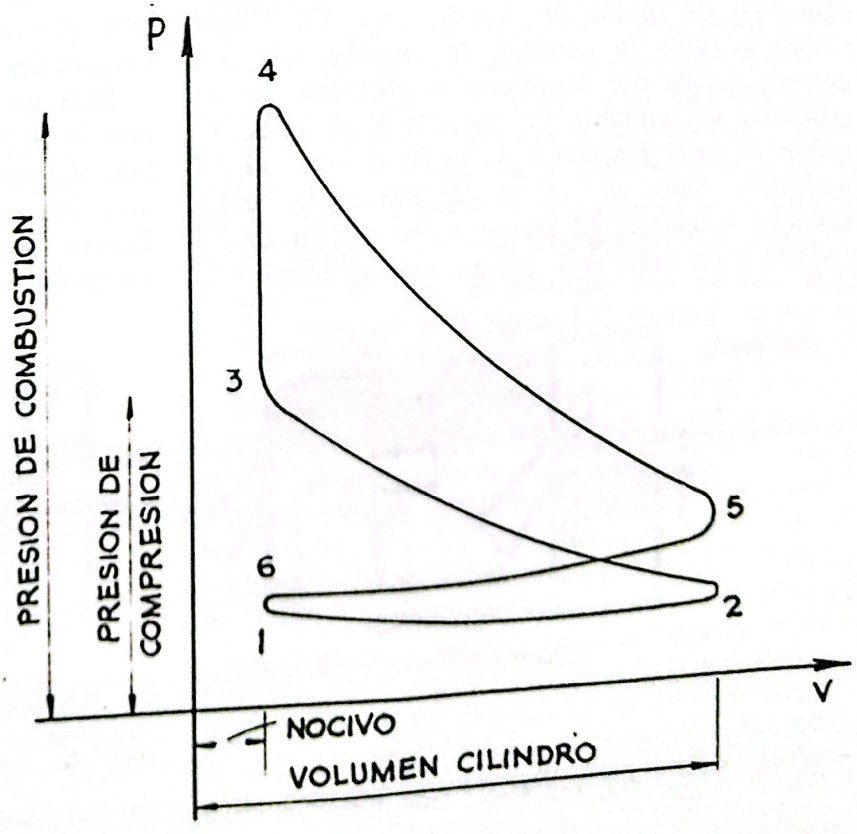


Fig. 133. - Ciclo de trabajo del motor de cuatro tiempos.

dro. Esas levas están accionadas por un eje que se llama *árbol de levas*.

La figura 133 muestra el ciclo de trabajo mediante el diagrama de presiones y volúmenes que ya conocemos. El punto 1 marca el comienzo del ciclo y el volumen que queda a la izquierda es el de la cámara de combustión, también llamado *espacio nocivo*. La admisión se hace a presión prácticamente constante y está marcada por la curva 1-2, donde llegado el punto 2, final del primer tiempo, se cierra la admisión y comienza la carrera de compresión o segundo tiempo. Tenemos aquí una compresión adiabática dada por la curva 2-3. En el punto 3 se produce la explosión o combustión brusca, debido a que se hizo trabajar el sistema de ignición y la chispa encendió la mezcla comprimida. La presión sube bruscamente hasta el punto 4 y comienza la expansión adiabática, dada por la curva 4-5. El tercer tiempo es el comprendido entre los puntos 3 y 5. En este último comienza el escape y con él el cuarto tiempo, que termina en el punto 6, que coincide con el 1, puesto que indica el comienzo de otro ciclo completo del motor.

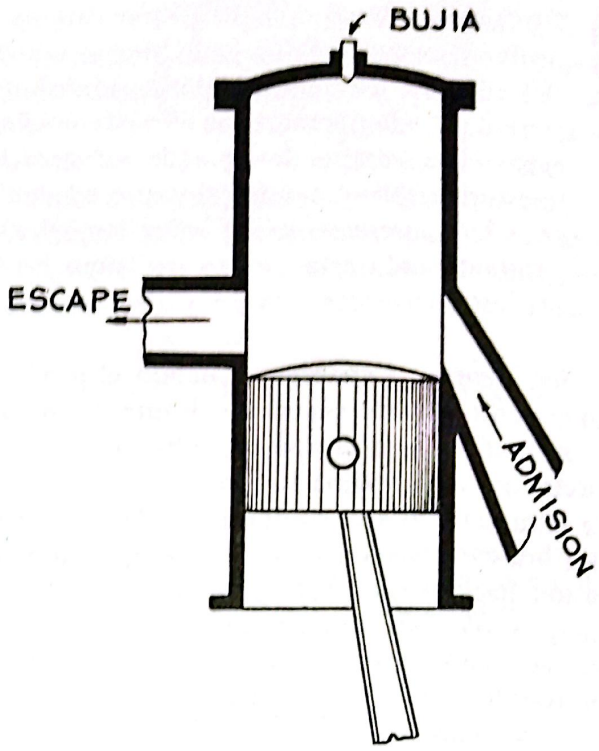


Fig. 134. – Corte esquemático del motor de dos tiempos.

Funcionamiento del motor de dos tiempos

La idea de aprovechar mayor número de tiempos o carreras del pistón en los motores de combustión interna, dio origen al motor de dos tiempos, en el cual una carrera es útil y la otra no. La figura 134 muestra un corte esquemático de un tipo de motor de dos tiempos. En primer lugar se nota la carencia de válvulas, que son reemplazadas por lumbreras o aberturas en las paredes del cilindro. En segundo lugar, la ubicación de tales lumbreras no es en el extremo del cilindro, sino en un punto intermedio entre ambos extremos. El pistón en su carrera abre y cierra a las lumbreras, permitiendo el acceso o la salida de gases al cilindro por ellas. Una de las aberturas es la de admisión y la otra la de escape, según se indican en la figura. Es importante hacer notar que, como falta la carrera de aspiración, en la cual se hacía funcionar al pistón como émbolo de una bomba, habrá que emplear una bomba auxiliar para hacer entrar en el cilindro a los gases y al mismo tiempo barrer los gases ya quemados. La bomba auxiliar complica el motor, pero piénsese que su empleo ahorra dos carreras inútiles del pistón.

Para comprender el funcionamiento observamos la figura 135, en la que se dan cuatro esquemas simples de la posición del pistón en el cilindro, dos posiciones para cada carrera o tiempo. Tomemos la primera carrera, hacia arriba, cuando comienza la admisión, que en estos motores se

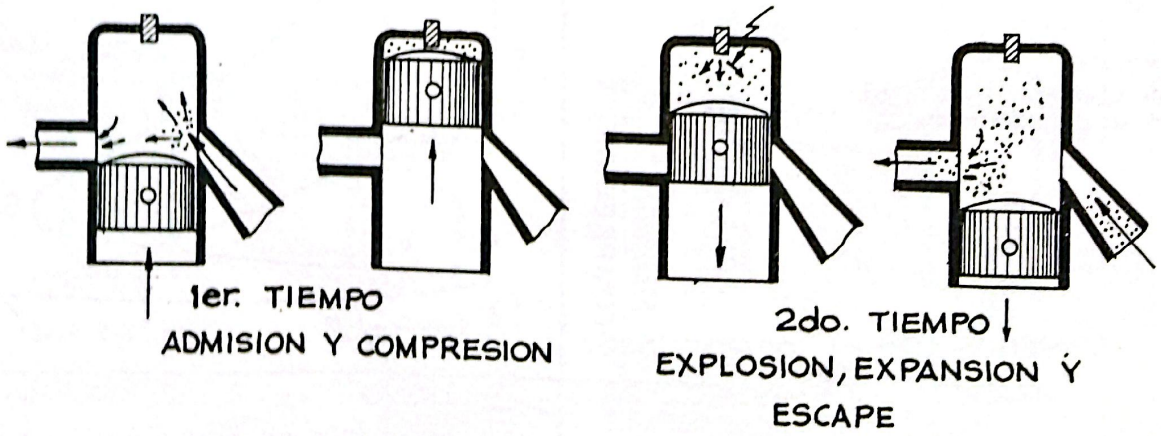


Fig. 135. – Proceso de funcionamiento del motor de dos tiempos.

substituye por la inyección del gas mediante una bomba, que al mismo tiempo provoca la expulsión o barrido de los gases. El pistón comienza la carrera de compresión y cuando cubre las lumbreras cesa la entrada de gas al cilindro y recién puede hablarse de compresión neta del gas. Al fin de esta carrera, el gas se encuentra fuertemente comprimido en la cámara de combustión, listo para que se produzca la chispa de ignición.

Comienza ahora el segundo tiempo o carrera del motor; en el instante en que se produce la chispa se origina la combustión brusca de la mezcla, se eleva fuertemente la presión y comienza la expansión. El pistón es empujado hacia abajo, según se ve en el tercer esquema. Cuando se descubre la lumbrera de escape, comienza a salir por ella el gas ya quemado, puesto que en el cilindro la presión es mayor que la atmósfera. Este es el momento en que puede trabajar la bomba de inyección de combustible, pues la lumbrera de admisión está abierta y la entrada del gas ayuda a barrer los gases de escape. Da comienzo, pues, nuevamente el primer tiempo del ciclo siguiente.

Ciclo de trabajo

Veamos ahora el diagrama de presiones y volúmenes de un motor de dos tiempos, según se ilustra en la figura 136. El punto 1 marca el comienzo del primer tiempo, en el cual entran

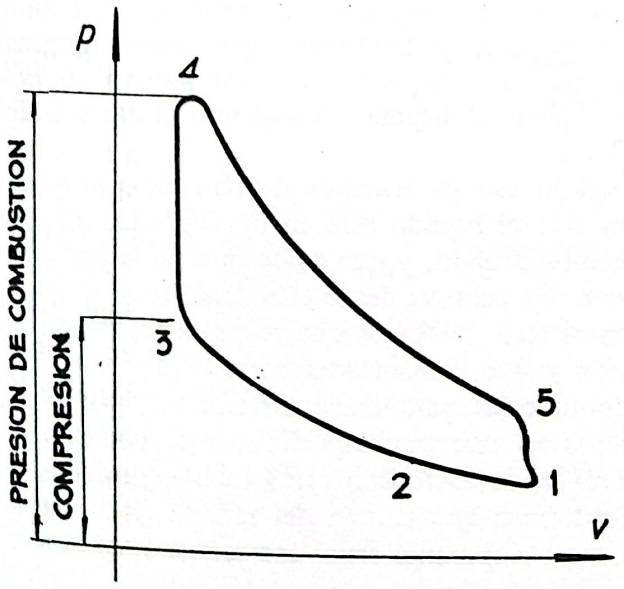


Fig. 136. – Diagrama de trabajo del motor de dos tiempos.

los gases al cilindro por impulsión de la bomba de alimentación. Desde el punto 1 hasta el 2 el pistón cumple una parte de su carrera y sigue entrando el gas. En 2 termina la admisión y comienza la compresión, que es aproximadamente adiabática, pues la camisa de refrigeración y el corto tiempo en que se realiza permite suponer que no hay intercambio de calor con el exterior. El punto 3 marca el fin del primer tiempo y de la compresión.

Este es el momento en que se produce la chispa en el interior de la cámara de combustión con lo que la presión se eleva bruscamente hasta el punto 4 y aquí comienza la expansión adiabática, marcada por la curva 4-5. En el punto 5 se abre la lumbrera de escape, por lo que la presión desciende y termina la carrera y el segundo tiempo en el punto 1, a la presión atmosférica y estando el motor listo para comenzar el primer tiempo del ciclo siguiente, igual al descripto.

Como resultado de la descripción dada, se nota en seguida que el tamaño del cilindro de los motores de dos tiempos debe ser mayor que el de los de cuatro para igual volumen útil, pero no hay que olvidar que hay doble número de carreras útiles.

La combustión

Si el combustible empleado para el motor térmico es directamente un gas, todo lo que hay que hacer es inyectarlo en el cilindro por el tubo de admisión mediante su comunicación con un depósito. La succión del pistón en el cilindro se encarga de que el gas pase del depósito al cilindro del motor. Este sería el caso de los motores térmicos a gas, de cuatro tiempos.

En los motores a nafta, se usa combustible líquido y para hacerlo entrar en combustión se lo vaporiza mediante una corriente de aire que rodea a un tubito de reducida sección de salida. El paso del aire succiona fuertemente en la boca del tubito y arrastra la nafta en forma de finas gotitas que forman con el aire la mezcla carburante. El aparato en que se produce esta mezcla se llama *carburador* y la figura 137 muestra un corte esquemático. Una chapita circular obtura más o menos el paso de la mezcla gaseosa y el motor produce sus emboladas más ligero o más despacio; esa chapa se llama *acelerador* y se acciona desde el exterior mediante un juego de palancas y un pedal.

En los motores *diesel,* se comprime en el cilindro el aire a mezclar con el combustible mediante una bomba, y cuando está comprimido se le inyecta el combustible (gas-oil) pulverizado directamente dentro del cilindro. Estos motores trabajan con presiones mucho mayores que los de nafta, al extremo que no necesitan la chispa de la

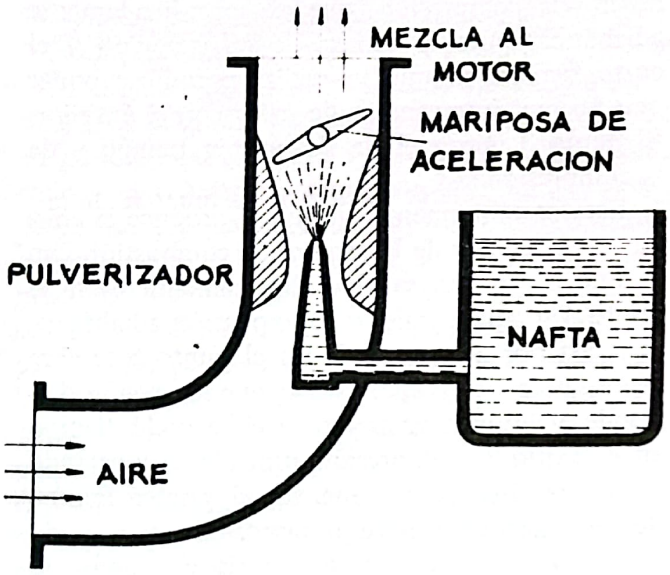


Fig. 137. - Principio de funcionamiento del carburador o gasificador de nafta.

bujía para producir la ignición de la mezcla carburante, sino que ello se produce espontáneamente. Algunos motores diesel tienen la bujía para lograr el funcionamiento inicial o arranque, porque estando frías las paredes del cilindro la combustión no se produce automáticamente.

Refrigeración

Los cuerpos, para cambiar de estado, necesitan una cantidad de calor de acuerdo con lo visto. Así, para fundir un sólido, esto es, para cambiarlo del estado sólido al líquido, hay que entregarle calor. Lo mismo para vaporizar un líquido hay que entregarle calor. En general absorben más calor los cuerpos en el pasaje de líquido a vapor que en el de sólido a líquido, por lo que se ha adoptado el primer cambio en casi todos los sistemas de enfriamiento. La excepción la constituye el hielo, para refrigeración directa, usada en equipos de escasa importancia.

Para fundir hielo hay que entregarle calor, o si no se le entrega, él lo toma de los cuerpos que lo rodean. Al fundirse absorbe calor del aire, enfriándolo. Luego el aire frío toma calor de los cuerpos colocados cerca y todos se enfrían. Para comprender rápidamente cómo se produce frío por evaporación de un líquido, no hay más que mojarse las manos con alcohol. Se notará el enfriamiento que se produce de inmediato por evaporación de alcohol. Igual cosa ocurre con el amoníaco, sulfuro de carbono, anhídrido carbónico, freón, etc.

El mecanismo a seguir puede resumirse en esto: un gas como cualquira de los mencionados al ser comprimido se vuelve líquido, aumentando su temperatura. Luego se lo enfría y se lo deja libre para que se expanda. Se evapora, absorbiendo calor de los cuerpos que lo rodean. Luego se comprime nuevamente y así se repite el ciclo. Teniendo en cuenta que cualquiera de los líquidos citados tienen temperaturas de vaporización sumamente bajas (bajo cero), se comprenderá que al evaporarse se producirá un enfriamiento intenso en la cámara en que ello suceda.

Ciclo de la refrigeración

Veamos ahora cómo trabaja un refrigerador común, del modelo utilizado en las heladeras pequeñas y medianas. La figura 138 muestra una vista del conjunto de elementos que intervienen: el compresor, el condensador y el evaporador, como elementos principales; el depósito, las tuberías, el ventilador, etc., como elementos auxiliares. Tengamos presente que casi todos los gases usados en los refrigeradores, como el amoníaco, anhidrido carbónico, freon, etc, tienen su temperatura de evaporación en la atmósfera debajo de los $-10°C$, de manera que basta colocar un recipiente abierto con el líquido, para que se evapore, pues la temperatura del ambiente será mayor que la de ebullición de ese líquido. Al vaporizarse, absorberán calor de los cuerpos que rodean al recipiente y tendremos una heladera simplísima y económica. Pero sucede que si dejamos evaporar al líquido se perderá, por difusión en el aire, y tendremos que seguir agregando líquido al recipiente. Por tal motivo conviene recuperar el líquido, recogiendo al gas y licuándolo.

Con eso ya tenemos nuestro ciclo de refrigeración: el líquido está en un depósito, pero que hemos cerrado, y que colocamos en la parte inferior. Un tubo va desde este depósito al recipiente en el cual queremos que se produzca la evaporación y que llamamos *evaporador.* Tiene una serie de tuberías para hacer circular el vapor frío y tener así una gran superficie de enfriamiento. El aire en contacto con estos tubos se enfría y así tendremos que dentro del recinto donde se coloca el evaporador reina una temperatura baja.

Del evaporador sale una tubería por la que se aspira el gas mediante el compresor, se lo comprime y así aumentará su temperatura. Si ahora lo enfriamos, se licuará lentamente. Para enfriarlo se lo hace pasar por el *condensador,* que tiene la forma de un serpentín enfriado por un ventilador. El líquido gotea al recipiente, y se repite el ciclo. En resumen pues, evaporamos el líquido

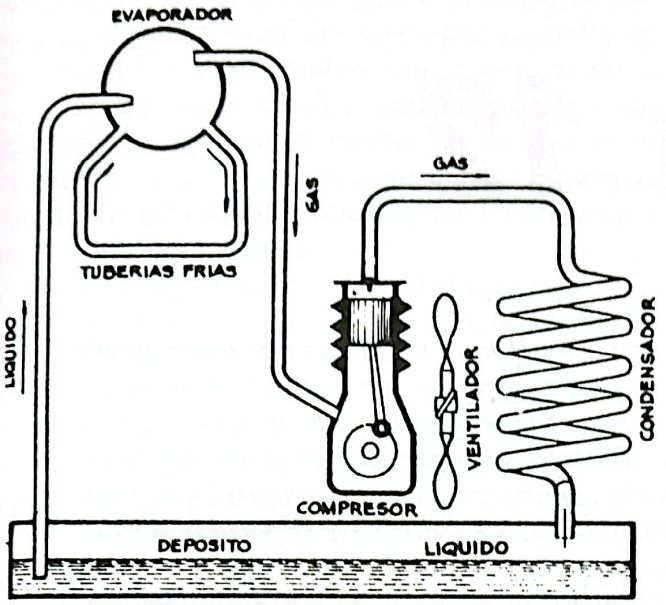


Fig. 138. - Diagrama esquemático de un conjunto refrigerador.

mediante un enfriamiento, y de aquí pasa nuevamente al recipiente.

Es evidente que el condensador debe estar alejado del evaporador, pues en el primero se produce calor y en el segundo frío. Por tal motivo el compresor, con el condensador y el depósito forma una unidad, unida por dos tubos con la cámara de evaporación, que está dentro del recinto que se debe enfriar. En las heladeras pequeñas la cámara está en la parte superior, bien aislada por paredes de material mal conductor (corcho, lana de vidrio, espuma plástica, etc.) y en la parte inferior se coloca la unidad comprensora-condensadora.

En los equipos de refrigeración en gran escala no se usa un ciclo como el descripto, pues sería menester un gran volumen del líquido activo. Se emplea la refrigeración indirecta, en la cual en el evaporador se enfría a una mezcla de salmuera, que es la que se hace pasar por las tuberías de la cámara fría. El líquido refrigerante enfría a la salmuera y ésta enfría al recinto útil.

Compresores rotativos

Los refrigeradores o heladeras domésticas requieren tener un tamaño reducido antes que un rendimiento comparable al de las instalaciones industriales; por este motivo se ha reemplazado el compresor a émbolo (figura 107) por uno rotativo cuyo corte esquemático puede verse en la figura 139. Tanto el cilindro principal como el rotor tienen forma cilíndrica y una paleta impulsada hacia afuera por un resorte se encarga de formar dos recintos en el cilindro. Como el rotor está montado en forma excéntrica, lo hemos dibujado en dos posiciones para que se note lo que ocurre al girar. En la posición de la izquierda comienza la aspiración entre el rotor, la paleta y el tubo de aspiración, pero al mismo tiempo la compresión en el resto del cilindro; esa compresión termina para la posición de la derecha, donde se ve que el gas comprimido sale por el tubo de descarga. Al continuar su giro el rotor empuja a la paleta y comienza a comprimir el gas que está debajo de él y a aspirar otra porción gaseosa. Así se cumplen los ciclos en cada giro del rotor.

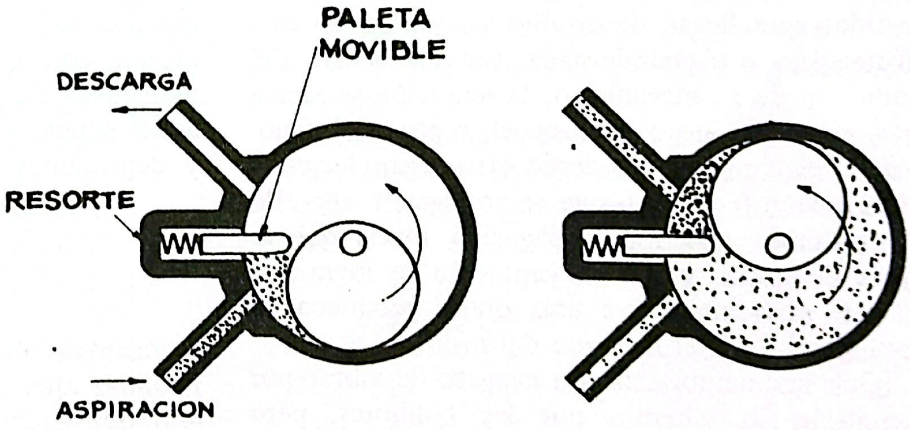


Fig. 139. - Corte esquemático de un compresor rotativo.

Día 12

En el grupo de agentes físicos invisibles pero que el hombre puede percibir a través de otros sentidos, se encuentra el sonido. Sea para comunicarse con sus semejantes, para advertir peligros, para deleitar su esparcimiento, el sonido desempeña un papel importante en la vida de los seres humanos. Y como su naturaleza es la de un movimiento vibratorio, recomendamos que antes de comenzar a leer este capítulo se haga una rápida revisión del estudio de los movimientos, especialmente a la parte que trata ese tipo en particular. La mayor parte de los efectos que causa el sonido son conocidos, pero lo importante es valorizarlos y explicar sus principios y eso es lo que hace la Acústica, rama de la Física que trata sobre el sonido. Dentro de la programación adoptada para este libro, que es la de sintetizar todos los temas para limitar su extensión, abordaremos en esta jornada el estudio de la Acústica siguiendo los lineamientos que rigieron los capítulos ya vistos. Con esta premisa, ponemos manos a la obra.

ESTUDIO DEL SONIDO—ACUSTICA

La sensación auditiva nos permite escuchar los sonidos que llegan desde diversas partes; en esta afirmación está condensada toda la teoría del sonido y de su mecanismo; la sensación se recibe por el *oído*, luego éste es el captor del fenómeno; el sonido *llega* desde otro lugar, luego se trata de un fenómeno que se propaga. Y con ello ya intuimos que tal propagación revela que se trata de ondas y que la captación se logra mediante vibraciones que esas ondas producen en una membrana: el *tímpano* del oído.

Que las membranas son capaces de vibrar por percusión lo sabemos por los tambores, pero tenemos que hablar de cómo aparece la percusión y cómo ella produce una vibración. Al describir la onda sonora aclararemos el punto con suficiente claridad.

La onda sonora

Supongamos que tomamos un balón de goma, como una cámara de pelota deportiva, y le aplicamos un compresor, vulgo inflador, tal como lo muestra la figura 140. Pero en lugar de inflar totalmente la cámara, le quitamos la válvula para que el aire vuelva del balón al subir el piston. Ahora efectuamos una serie de movimientos de ascenso y descenso del pistón, y produciremos en el balón consecuentes infladas y desinfladas. El aire en torno al balón sufrirá compresiones y descompresiones que se propagan alejándose del mismo, cosa que nos recuerda a la figura 36. Las moléculas del aire obran como las bolitas de aquél experimento y tendremos que las presiones y depresiones producidas en el aire se propagan

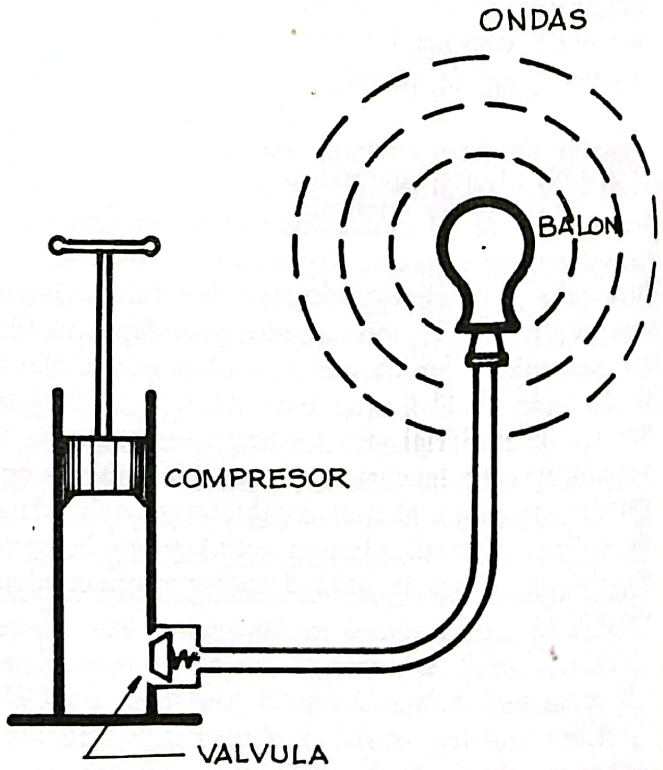


Fig. 140. – Dispositivo para producir ondas de compresión y descompresión del aire.

Día 12

En el grupo de agentes físicos invisibles pero que el hombre puede percibir a través de otros sentidos, se encuentra el sonido. Sea para comunicarse con sus semejantes, para advertir peligros, para deleitar su esparcimiento, el sonido desempeña un papel importante en la vida de los seres humanos. Y como su naturaleza es la de un movimiento vibratorio, recomendamos que antes de comenzar a leer este capítulo se haga una rápida revisión del estudio de los movimientos, especialmente a la parte que trata ese tipo en particular. La mayor parte de los efectos que causa el sonido son conocidos, pero lo importante es valorizarlos y explicar sus principios y eso es lo que hace la Acústica, rama de la Física que trata sobre el sonido. Dentro de la programación adoptada para este libro, que es la de sintetizar todos los temas para limitar su extensión, abordaremos en esta jornada el estudio de la Acústica siguiendo los lineamientos que rigieron los capítulos ya vistos. Con esta premisa, ponemos manos a la obra.

ESTUDIO DEL SONIDO–ACUSTICA

La sensación auditiva nos permite escuchar los sonidos que llegan desde diversas partes; en esta afirmación está condensada toda la teoría del sonido y de su mecanismo; la sensación se recibe por el *oído*, luego éste es el captor del fenómeno; el sonido *llega* desde otro lugar, luego se trata de un fenómeno que se propaga. Y con ello ya intuimos que tal propagación revela que se trata de ondas y que la captación se logra mediante vibraciones que esas ondas producen en una membrana: el *tímpano* del oído.

Que las membranas son capaces de vibrar por percusión lo sabemos por los tambores, pero tenemos que hablar de cómo aparece la percusión y cómo ella produce una vibración. Al describir la onda sonora aclararemos el punto con suficiente claridad.

La onda sonora

Supongamos que tomamos un balón de goma, como una cámara de pelota deportiva, y le aplicamos un compresor, vulgo inflador, tal como lo muestra la figura 140. Pero en lugar de inflar totalmente la cámara, le quitamos la válvula para que el aire vuelva del balón al subir el piston. Ahora efectuamos una serie de movimientos de ascenso y descenso del pistón, y produciremos en el balón consecuentes infladas y desinfladas. El aire en torno al balón sufrirá compresiones y descompresiones que se propagan alejándose del mismo, cosa que nos recuerda a la figura 36. Las moléculas del aire obran como las bolitas de aquél experimento y tendremos que las presiones y depresiones producidas en el aire se propagan

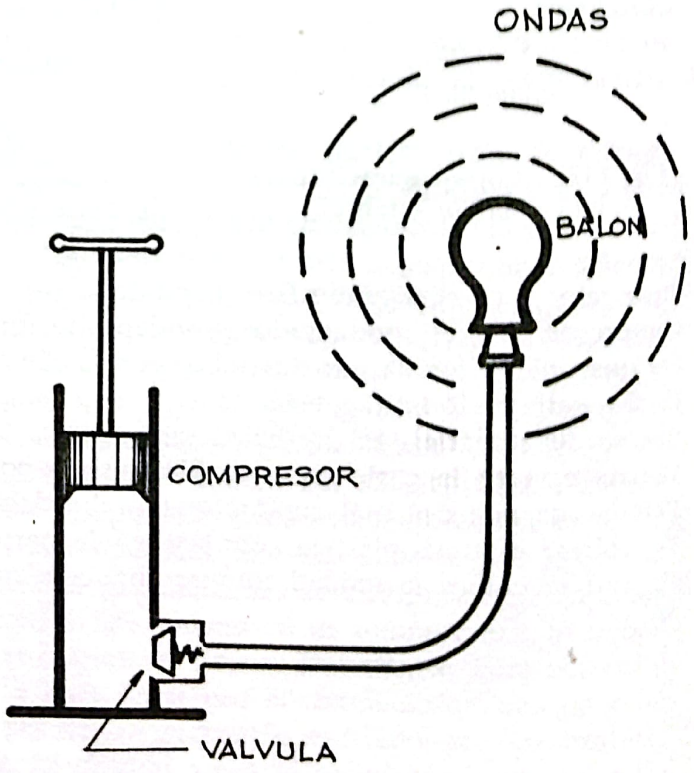


Fig. 140. – Dispositivo para producir ondas de compresión y descompresión del aire.

en forma de ondas, en todas direcciones. Si el movimiento de vaivén del pistón lo hacemos con rapidez, digamos unas 30 veces por segundo, se comenzará a oir un zumbido en el aire, es decir que empezamos a *oir* algo; aumentando la velocidad del pistón con el auxilio de un motor, el sonido irá pasando de un tono grave a uno más agudo y llegará cierta velocidad del fenómeno en que ya no oiremos nada.

Todo lo dicho resume la formación de la onda sonora y sus características principales. El sonido es una vibración del aire, la cual se propaga en todas direcciones. Si el sonido se produce dentro de un recipiente en el cual se ha hecho el vacío, no hay propagación, diríamos que no hay sonido porque faltan los corpúsculos (moléculas del aire) que permiten que se propague el fenómeno. El experimento clásico es colocar un reloj dentro de un tubo al cual se le extrae el aire; no se percibe el tic-tac que sabemos se está produciendo por el golpe de la pieza basculante interior.

No hace falta complicarnos la vida con el aparato descripto para producir un sonido. Dando un golpe en una lámina elástica la hacemos vibrar y se producirán las compresiones y descompresiones del aire y con ello la onda sonora. Sosteniendo un serrucho por ambos extremos y golpeando su parte central se produce un sonido; pulsando la cuerda de una guitarra, golpeando la membrana de un tambor, raspando la cuerda de un violín y soplando aire por el tubo de una corneta, también hay sonido y luego debe haber vibraciones. Es interesante que analicemos cómo se producen tales vibraciones.

Las vibraciones sonoras

Si tomamos distintos tamaños de serruchos y hacemos con ellos lo que dijimos para producir sonido, encontraremos que esos sonidos son diferentes. Los serruchos largos dan tonos graves, bajos, mientras que los serruchos cortos dan tonos agudos, altos. Eso sin considerar otros factores como el espesor de la hoja, etc. Es decir que una lámina metálica produce un sonido si se la hace vibrar, y las características de tal sonido dependen de sus dimensiones. Son conocidos los *diapasones* (figura 141) que usan los médicos para examinar nuestros oídos; se trata de barras metálicas dobladas con diferentes dimensiones que vibran al recibir un golpe y emiten un sonido que oímos al acercarlo al oído.

Las cuerdas tensas también vibran al producirles un impulso que se hace mediante un pellizco lateral o raspándola con un elemento elástico.

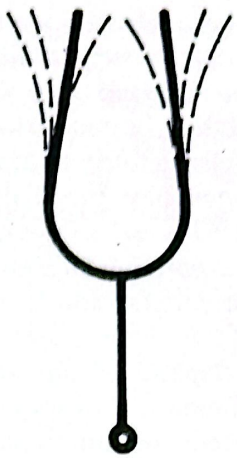


Fig. 141. – El diapasón produce sonidos como lámina vibrante.

Los tonos obtenidos dependen del grosor y material de la cuerda, pero también de la longitud, la que se varía en el caso de la guitarra y el violín colocando los dedos en diferentes posiciones que limitan la longitud a la porción comprendida entre el extremo opuesto y la posición del dedo que presiona.

Las membranas de cuero, metal u otros materiales se usan para producir vibraciones por impacto en algunos instrumentos musicales; en la batería hay membranas de las dos clases, la de cuero está tensa y la metálica está simplemente colgada de su centro. La pandereta es un caso similar, pero se acciona golpeándola con el puño en la tensa y haciendo que se golpeen entre si los pares de discos metálicos que tiene repartidos en el contorno.

Los tubos sonoros son otro caso de fuentes de sonido; en ellos la vibración se produce en la columna de aire que tienen en el interior. En

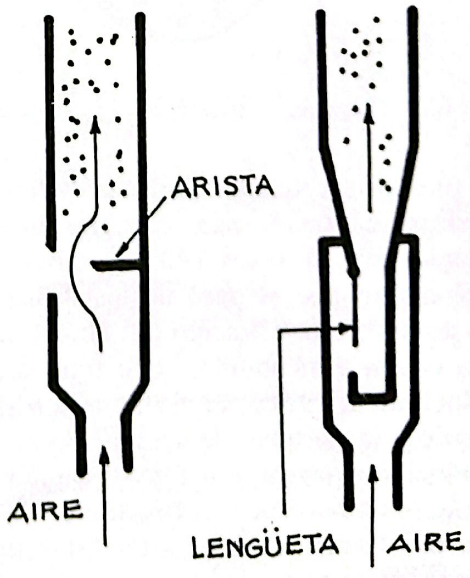


Fig. 142. – Los dos tipos de tubos de órgano para producir sonido por columna vibrante.

unos casos son abiertos por un extremo y en otros son cerrados en ambos extremos pero tienen orificios repartidos en su longitud que se pueden abrir mediante valvulitas o quitando los dedos con que se los tapa (clarinete y flauta, respectivamente). En los órganos hay tubos de aire largos, de dos tipos, ilustrados en la figura 142, mostrándose solamente su porción inferior. El de la izquierda es el tubo de arista, donde el aire pasa por un estrechamiento y el de la derecha es el de lengüeta, donde el paso del aire se hace a través de una delgada lámina metálica que toma ese nombre. El aire procede de un fuelle soplador. La vibración de la columna de aire produce sonidos cuyo tono depende de la longitud del tubo y todo el que ha visto un órgano habrá podido observar que tiene una serie de tubos de longitudes crecientes, correspondiendo los más largos a los tonos graves y a los cortos los agudos. En general la frecuencia del sonido, término del cual nos ocuparemos más adelante, es inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de la lámina vibrante.

Un caso particular de fuente de sonido lo constituye la *sirena*, ilustrada esquemáticamente en la figura 143. Se trata de un disco con una serie de orificios cerca del borde. Mediante un tubo se dirige contra el disco que gira un chorro de aire que pasa por los orificios girantes. El corte del chorro por el paso de los llenos entre orificios produce una vibración del chorro de aire y ello da origen a un sonido, cuyo tono depende de la velocidad del disco. Si el disco da n vueltas por segundo y la cantidad de agujeros es m, el sonido producido equivale a una lámina que vibrará a razón de mn vibraciones por segundo. Es conocido el sonido ululante de la sirena, que precisamente se usa para casos de alarma o para advertir el paso de los vehículos de las brigadas de seguridad o emergencia.

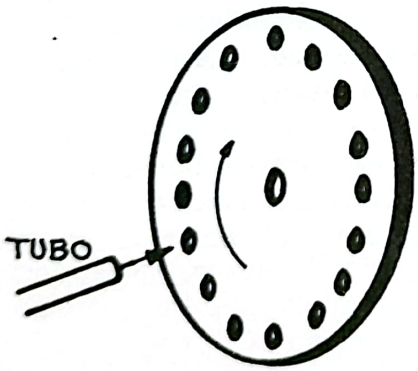


Fig. 143. Diagrama esquemático de una sirena.

Características del sonido

Al hablar del sonido producido por vibraciones hicimos referencia a la frecuencia de las mismas, y eso ya es una información sobre las características del sonido. El sonido es una vibración y la onda sonora es la propagación de la misma. Como toda onda, puede ser representada por una curva senoide, figura 144, que tiene tres características fundamentales: frecuencia, amplitud y forma. Apliquemos esas definiciones al caso del sonido

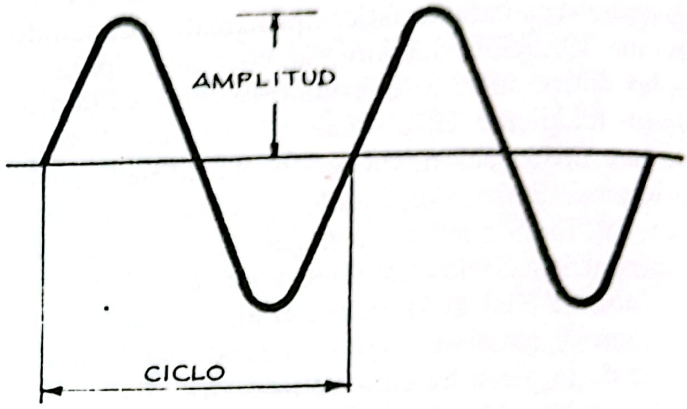


Fig. 144. Una onda sonora se representa mediante una senoide.

Se llama *frecuencia* de una onda a la cantidad de ciclos que se cumplen en un segundo; en sonido, ello corresponde al *tono*. Los tonos bajos o graves son los que tienen pocos ciclos por segundo y los tonos altos o agudos son los que tienen muchos ciclos por segundo. Para dar cifras, se acostumbra a subdividir la lista de frecuencias posibles en gamas o bandas. El oído humano capta, en cifras medias tomadas entre un gran número de personas, vibraciones comprendidas entre 16 y 16.000 ciclos por segundo. Los sonidos o tonos comprendidos entre 16 y 600 ú 800 c/s se llaman tonos *bajos* o *graves*; los comprendidos entre esa cifra y los 4.000 a 5.000 c/s se llaman *tonos medios* y los que superan esta cifra hasta el límite superior son los *tonos agudos* o *altos*.

Se llama amplitud o *intensidad* de un sonido a la mayor o menor presión máxima que la vibración produce en el aire. Así un sonido puede ser débil o intenso, según la magnitud de esa presión. Como las presiones son cifras variables, que dependen del instante que se considere, pues tienen máximos de presión, ceros y máximos de depresión, se toma el valor máximo o amplitud correspondiendo con el momento de la cresta de la onda vibrante o sonora, tal como lo indica la figura 144.

Se llama *timbre* de un sonido al resultado de la forma de la onda de la vibración. Por ejemplo, una nota de 4.000 c/s de un violín suena muy diferente que la de un piano o la de un órgano y ello se debe a la diferente forma de onda. La gráfica de la figura 144 es una onda senoidal *pura* es decir que es el resultado de una vibración sin *armónicas*. Al producirse las vibraciones, un mismo cuerpo vibrante produce vibraciones de doble, triple, etc. frecuencia y todas ellas se superponen para dar una vibración compuesta. La forma de onda de las vibraciones compuestas ya no es una senoide, sino una curva como la de la figura 145; esa curva muestra una inflexión producida por el efecto de la superposición de vibraciones de doble, cuádruple, etc. frecuencia, o sea de lo que se llama armónicas pares. Las de frecuencias triple, quíntuple, etc. son armónicas impares.

Las láminas, membranas, tubos, etc. vibrantes producen vibraciones en el tono principal o fundamental, y producen al mismo tiempo una serie de armónicas. El resultado es un sonido complejo o compuesto, cuya forma de onda será como la de la figura 145 o más deformada todavía. Pero

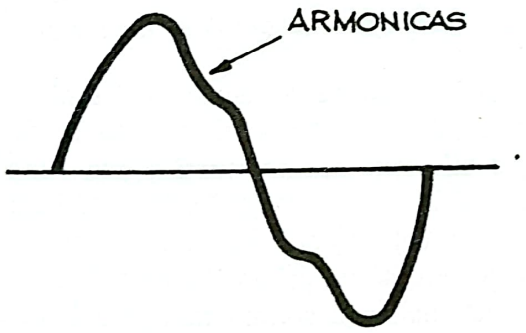


Fig. 145. Ondas armónicas en su representación gráfica.

simpre se tratará de una forma de onda simétrica con respecto al eje, que corresponde a un tono armónico. Si una vibración tiene una forma de onda como la de la figura 146, con alteraciones caprichosas, donde son diferentes las longitudes de los semiciclos y las deformaciones superiores e inferiores, estamos en presencia de lo que se llama *ruido* y no *sonido*. La sensación agradable se cambia por otra desagradable, incluso llega a ser molesta; esta es la diferencia entre música y ruido, entre sonido armónico y vibración desordenada.

Propagación del sonido

La onda sonora producida según el principio expuesto en la figura 140, se propaga mediante la acción recíproca de las moléculas del aire. Desde el lugar de la perturbación las ondas salen en todas direcciones y un observador colocado en un lugar distante percibe el sonido producido al incidir la onda sonora en su membrana auditiva o *tímpano*. Lógicamente, en otros cuerpos que no sean aire también hay moléculas y luego se cumplirá la propagación de la onda sonora. Si golpeamos el extremo de una barra larga de metal, arrimando el oído al otro extremo percibiremos el ruido del golpe.

Pero si observamos a un obrero golpeando con una maza a cierta distancia, el ruido lo percibimos después de ver el golpe, lo que nos dice que la propagación de la onda sonora se cumple a una cierta velocidad y que la vibración tarda en llegar a nosotros. Inclusive, diremos que la velocidad del sonido es diferente a través de distintos cuerpos y que influye el estado de los mismos; por ejemplo, la velocidad cambia en el aire húmedo con respecto al seco.

En general, la velocidad de propagación depende mucho del estado del cuerpo, es decir si es sólido, líquido o gaseoso, por la influencia grande que tiene en esa propagación los movimientos de las moléculas; tomando cuerpos típicos, esas velocidades, en m/s son:

Aire	333
Agua	1.450
Hierro	5.100

Estos datos nos explican el motivo de que se escuchen claramente conversaciones de los ocupantes de un bote desde otro ubicado a distancia,

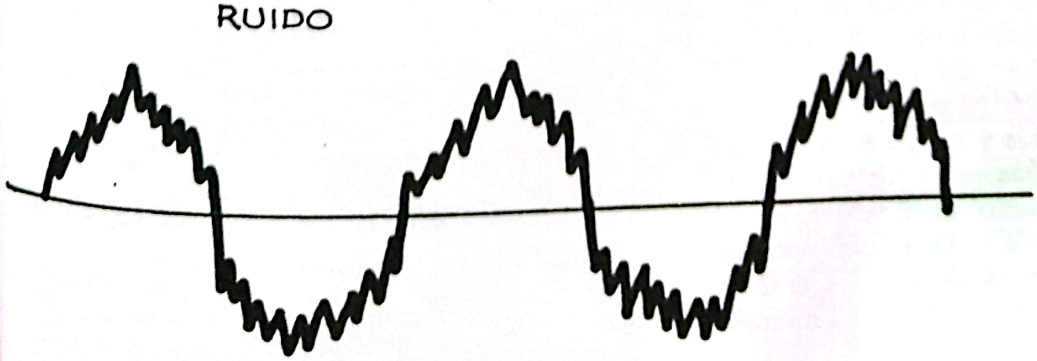


Fig. 146. Representación de una onda de ruidos.

pues el sonido se propaga favorablemente por el agua.

Reflexión y refracción

Las ondas sonoras en su propagación sufren los efectos que le ocasionan los cuerpos que hallan a su paso. Así, si una onda sonora choca contra una superficie densa vuelve hacia atrás, cumpliendo lo que se llama *reflexión* de la onda; ocurre tal como si arrojamos una pelota contra la pared. La reflexión se cumple de tal manera que el ángulo de incidencia de la onda es igual al ángulo de reflexión; este ángulo es el que forman las ondas de llegada y de salida con la perpendicular al plano de choque.

Una aplicación del fenómeno de reflexión lo tenemos en la sonda sonora para determinar la profundidad del lecho del mar (figura 147). En el

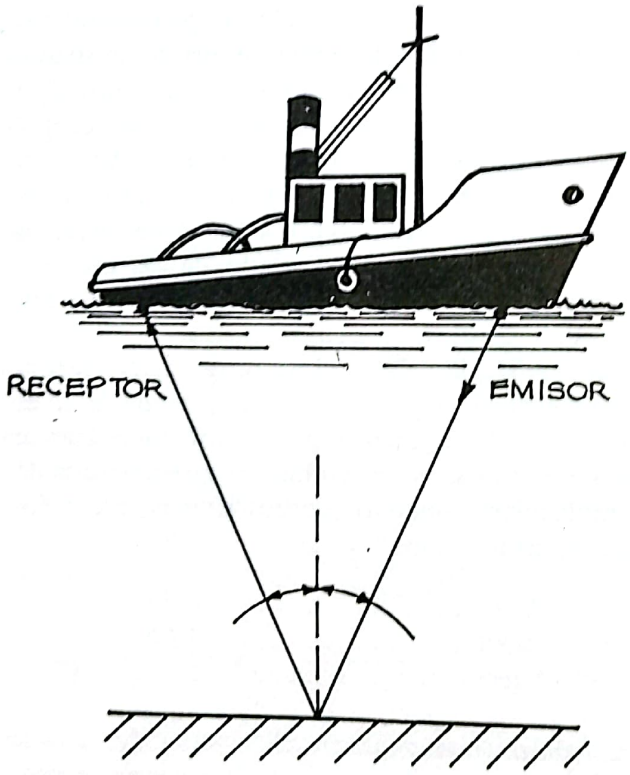


Fig. 147. – La reflexión de las ondas sonoras se emplea en la sonda marina.

fondo del barco se coloca un emisor de sonido, dirigiendo la onda hacia abajo; la misma choca contra el fondo y vuelve al barco, donde hay un receptor de la vibración. El tiempo que tarda la onda en ir y volver se mide y conociendo la velocidad del sonido en el agua, se puede determinar la altura. Claro, el producto de la velocidad del sonido por el tiempo tardado da el doble de esa altura o profundidad, según las leyes de la Cinemática. De paso, en la figura 147 hemos marcado los ángulos de incidencia y reflexión, que son iguales.

Otro fenómeno que ocurre cuando la onda sonora se propaga por un medio y penetra en otro diferente, es la *refracción*. La figura 148 nos

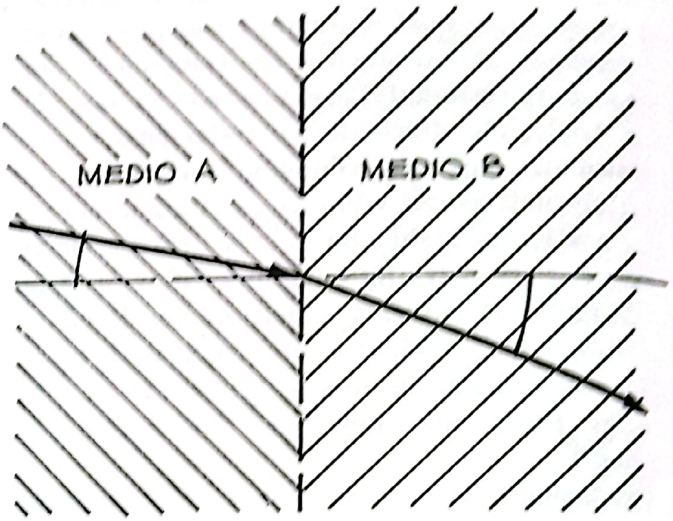


Fig. 148. – La refracción del sonido al cambiar de medio de propagación.

muestra que ocurre una desviación de la onda sonora, pues el ángulo de salida del plano que separa ambas medios es mayor que el de llegada; otras veces el ángulo de salida es menor que el de llegada.

Un caso típico de refracción del sonido es el que se produce en el aire, cuando se forman capas de diferente temperatura, y por tanto medios de diferente naturaleza en lo que hace a la propagación del sonido. La onda sonora se propaga mejor en el aire caliente y en el húmedo, de modo que una onda sonora rasante a la tierra se refracta y se desvía hacia arriba, no llegando hasta un observador que está a una distancia no muy grande; eso ocurre durante el día en que el sol calienta la tierra, pero a la noche, suele ocurrir que el aire esté más caliente que la tierra, y entonces la refracción produce una desviación inversa, haciendo que el sonido sea más rasante. Es común que los sonidos se escuchen a mayor distancia de noche que de día.

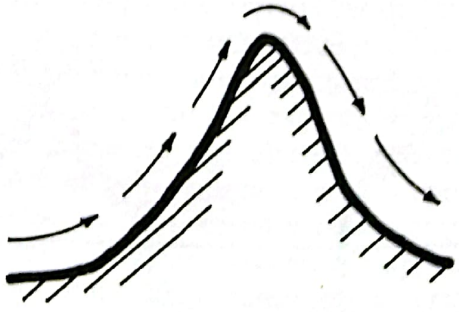


Fig. 149. – La refracción hace que el sonido pase obstáculos.

Otro caso de refracción sería el de una montaña, cuando la onda sonora se oye del otro lado de ella; lo que ocurre es que la onda rasante sufre una serie de refracciones que la van acercando a la tierra y la hacen bordear la montaña (figura 149). Las distintas temperaturas de las capas de aire comparadas con la de las masas rocosas son la causa de tales refracciones sucesivas.

Interferencia de ondas

Cuando dos ondas se encuentran los fenómenos que ambas ocasionan se superponen, produciendo lo que se llama *interferencia.* Por ejemplo, si dos ondas sonoras de frecuencias parecidas, como las representadas en las senoides (1) y (2) en la figura 150, se encuentran en el espacio, las vibraciones que ambas ocasionan se superponen; esto equivale a sumar las dos curvas y si lo hacemos obtendremos la gráfica (3), que toma el nombre de *pulsación* o *batido*. Si se camina en el recinto o espacio donde están superpuestas las dos ondas, se notarán zonas de sonido fuerte y zonas débiles, que corresponden a las pulsaciones y los silencios. El número de pulsaciones que se encuentra es igual a la diferencia entre las frecuencias de las ondas que producen la interferencia.

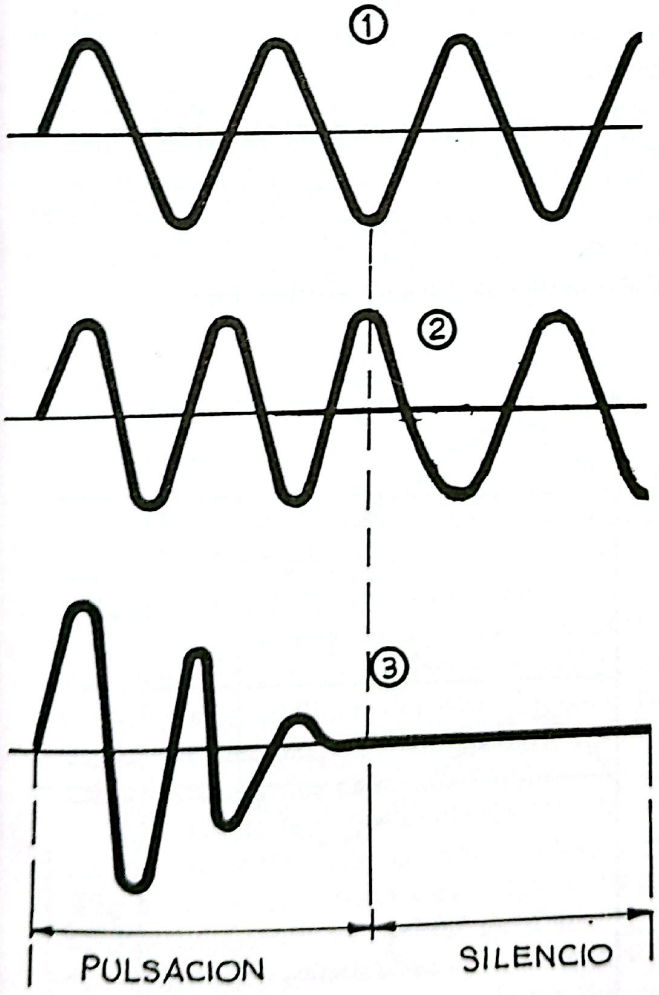


Fig. 150. – La interferencia de ondas produce pulsaciones o batidos.

Las pulsaciones, producidas a lo largo del espacio en el ejemplo dado, también pueden encontrarse a lo largo del tiempo. Dos sonidos interferentes dan tonos cortos a intervalos regulares, cuya frecuencia corresponde a la de batido, o sea a la diferencia entre las frecuencias de los dos sonidos originales.

Otros casos de interferencia se producen entre una onda y su reflejo. Si dentro de una habitación hacemos incidir una onda sonora contra las paredes, se producirán reflexiones sucesivas; cada onda incidente con la emergente forma un par de ondas cuyos máximos y ceros no coinciden en el espacio, luego la suma de las senoides respectivas da como resultado una onda de interferencia. Eso se nota si accionamos un silbato en una habitación cerrada; recorriendo la misma se notarán zonas de sonido fuerte y otras de sonido débil, prueba de que hay interferencias.

El efecto Doppler

Cualquier persona que haya estado parada cerca de las vías de un tren habrá podido escuchar el silbato de una locomotora; bien, el tono del mismo no se escucha como de frecuencia fija, sino que la misma varía mientras el tren se acerca y cuando se aleja nuevamente (figura 151). Dicho en otros términos, lo oímos como un sonido ululante y no de tono fijo.

Ese cambio de tono o frecuencia en el sonido se debe a la superposición de dos movimientos. En efecto, mientras el tren avanza desde *A* hacia *B*, el sonido, su onda sonora, viaja desde *A* hasta el observador. Lógicamente, estamos frente a una superposición de movimientos, y debemos sumar sus velocidades; dicho en otros términos, la onda sonora tiene una velocidad incrementada por la velocidad del tren. Para visualizar mejor el fenómeno observemos la figura 152 que nos muestra tres senoides que representan las ondas del sonido: a) es la onda normal, si no actuara el tren, b) es la onda que se acorta en el tramo en que el tren se acerca al observador y c) es la onda alargada cuando el tren se aleja del observador. Claro, el tren arrastra al sonido y entonces la onda sonora forma su ciclo en una distancia más corta en a) mientras que en b) el sonido viaja

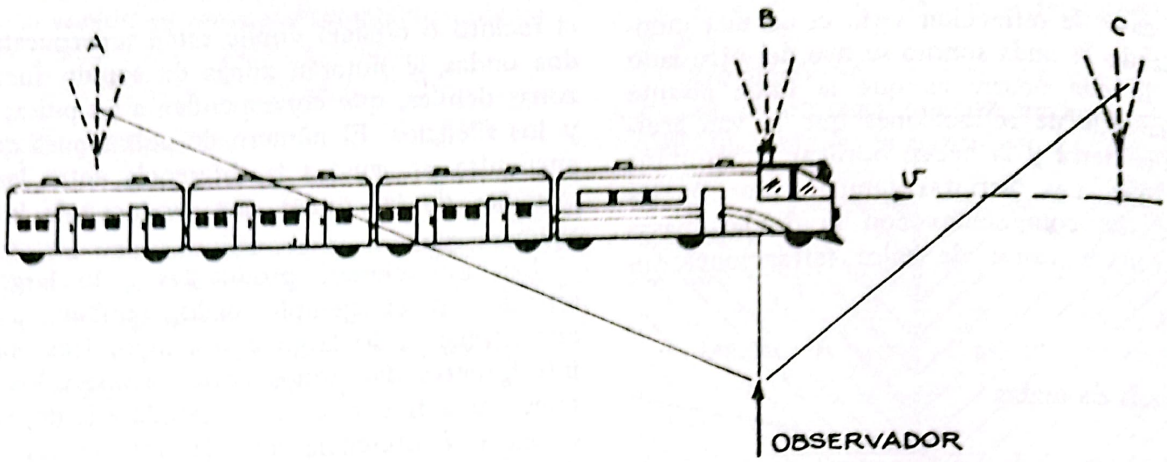


Fig. 151. – El efecto Doppler se comprueba al paso de un tren.

contra el movimiento del tren y éste la arrastra, alargando su ciclo.

Se puede determinar el efecto que esos acortamientos y alargamientos de la onda tienen sobre la frecuencia del sonido que escuchará el observador, ya que las cantidades en juego son conocidas. Llamemos:

V = velocidad del sonido en el aire.
v = velocidad del tren.
T = período o duración de un ciclo del sonido.
λ = longitud de onda del sonido solo.
λ_r = longitud de onda resultante para el sonido.
f = frecuencia del sonido solo: $1/T$.
f_r = frecuencia resultante para el sonido.

Durante un ciclo del sonido, en el tramo AB (figura 151) el tren produce un acortamiento de la onda sonora dado por el producto vT, luego, la longitud de onda resultante (figura 152) será:

$$\lambda_r = \lambda - v\,T = \lambda - \frac{v}{f}$$

Donde el reemplazo del período T por su inversa la frecuencia f, fue estudiado para el movimiento oscilatorio; pero la longitud de onda resultante es el cociente entre la velocidad del sonido y su frecuencia real:

$$\lambda_r = \frac{V}{f_r}$$

De donde, igualando ambas expresiones tenemos:

$$\frac{V}{f_r} = \frac{V}{f} - \frac{v}{f} = \frac{1}{f}(V - v)$$

En cuya igualdad resulta simple encontrar el valor de la frecuencia resultante:

$$f_r = f\,\frac{V}{V - v}$$

Expresión que nos dice que la frecuencia del sonido cuando el tren se acerca al observador será mayor que la original. En el tramo de alejamiento BC la onda de sonido se estira, curva c) de la figura 152, y entonces la longitud de onda resultante se encuentra sumando los términos en lugar de restarlos. Haciendo operaciones matemáticas similares a las anteriores sale:

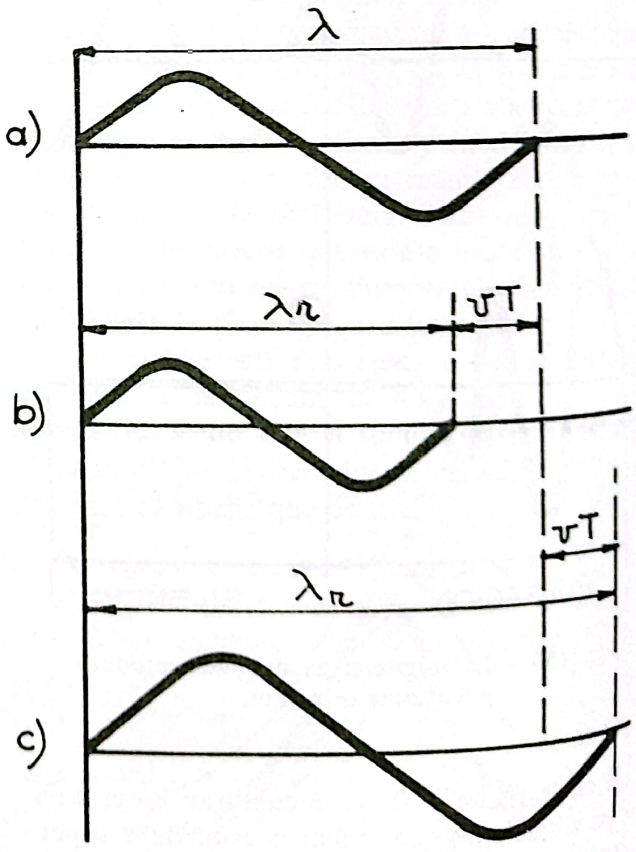


Fig. 152. – Acortamiento y alargamiento de la longitud de onda del sonido por el efecto Doppler.

$$f_r = f\frac{V}{V + v}$$

que da un valor de la frecuencia real menor que la original.

Ejemplo: Si un tren avanza a unos 30 m/s (aprox. 100 Km/h) y emite un sonido de 1.000 c/s con su silbato, ¿qué tono escuchará el observador? Considerando la velocidad del sonido en el aire como de 330 m/s, hacemos operaciones:

$$f_r = 1000\,\frac{330}{330 - 30} = 1.100 \text{ c/s}$$

Y cuando el tren se aleja del observador, la frecuencia percibida será:

$$f_r = 1000\,\frac{330}{330 + 30} = 900 \text{ c/s}$$

Recordando que cuando el tren pasa frente al observador, éste escuchará directamente el tono de 1.000 c/s.

Este es el análisis efectuado por Doppler para justificar que, pese a que el pito de la locomotora emite un sonido de frecuencia fija, el observador lo oye con frecuencia cambiante, mayor cuando el tren se acerca y menor cuando se aleja; en el momento en que el tren pasa junto al observador, se escucha el sonido con su frecuencia real.

Nivel sonoro

La percepción de los sonidos se realiza en el ser humano por intermedio de su oído y en consecuencia todos los estudios cualitativos y cuantitativos que se hagan sobre sonidos deben tener en cuenta el comportamiento del oído. Así, si se estudia la sensibilidad del oído humano para distintas frecuencias, se comprobará que no hay uniformidad en las cifras resultantes.

Para analizar el comportamiento del oído se toman dos potencias sonoras límites, la máxima y la mínima. La máxima es la que corresponde a lo que se denomina *umbral de dolor,* o sea que las vibraciones acústicas son de tal intensidad que la sensación produce una molestia dolorosa. La mínima es, lógicamente, la intensidad que comienza a percibirse, y se llama *umbral de audibilidad.*

Para evaluar entonces la sensibilidad del oído a distintas frecuencias de ondas sonoras, tomaremos dos límites para cada frecuencia a considerar. Pero, falta determinar la unidad de medida que conviene adoptar para referir esos dos umbrales. Hemos mencionado las palabras potencia e intensidad, pero siempre que se quiere decir que una cosa es grande o es chica, se hace una comparación o referencia con otra considerada intuitivamente como patrón de medida. Para hablar de fuerte o débil, habrá también que relacionar la magnitud con otra básica. Así se llega a la expresión *nivel sonoro* que resulta de relacionar o comparar dos potencias o dos intensidades, una de ellas considerada como básica o *nivel cero.* Por ejemplo, podríamos tomar como nivel cero o de referencia el aletear de una mosca; un sonido tendrá un nivel de 200 veces, cuando su intensidad es 200 veces mayor que el básico.

Pero ocurre que el oído humano aprecia las magnitudes sonoras en proporción del logaritmo de las intensidades, o sea que una fuente sonora de doble intensidad no causa una sensación sonora de doble efecto, sino una de un 30 % mayor; claro, la característica fisiológica del oído no sabe de matemáticas, sino que la sensibilidad del oído responde o coincide con una ley matemática. Acotemos que el logaritmo de 2 vale 0,3 y entonces el incremento de sensación para doble intensidad es 0,3 o sea 30 %. Para el lector no familiarizado con las Matemáticas sugerimos un repaso al tema de logaritmos.

Así las cosas, habría que relacionar intensidades y tomar el logaritmo de esa relación. La unidad de esa operación fue llamada Bel, en honor del gran físico; como resultaba una unidad un poco grande, se tomó una diez veces menor, y se la llamó *decibel.* Haciendo ahora una definición concreta, tenemos que el nivel sonoro se calcula multiplicando por 10 el logaritmo de la relación de potencias sonoras, la existente y la de referencia cero. Por este motivo, el gráfico de sensibilidad del oído que aparece en la figura 153, toma en las ordenadas o eje vertical los niveles sonoros en decibel (dB). En el eje horizontal, se toman las frecuencias; se ve que este eje no presenta divisiones decimales sino logarítmicas, porque la gama de frecuencias audibles es muy extendida y con divisiones decimales la zona de los primeros 100 c/s quedaría muy pequeña, sin detalles, frente a la zona total de 20.000 c/s.

En el gráfico observamos dos curvas que encierran la zona de audibilidad; la curva inferior marca el umbral de audibilidad, o sea el nivel mínimo para cada frecuencia que se requiere para que el sonido se escuche. La curva superior marca el umbral de dolor, o sea el nivel máximo que puede escuchar normalmente el ser humano. Aclaramos que estas curvas son un promedio entre muchos individuos, pues cada uno tiene

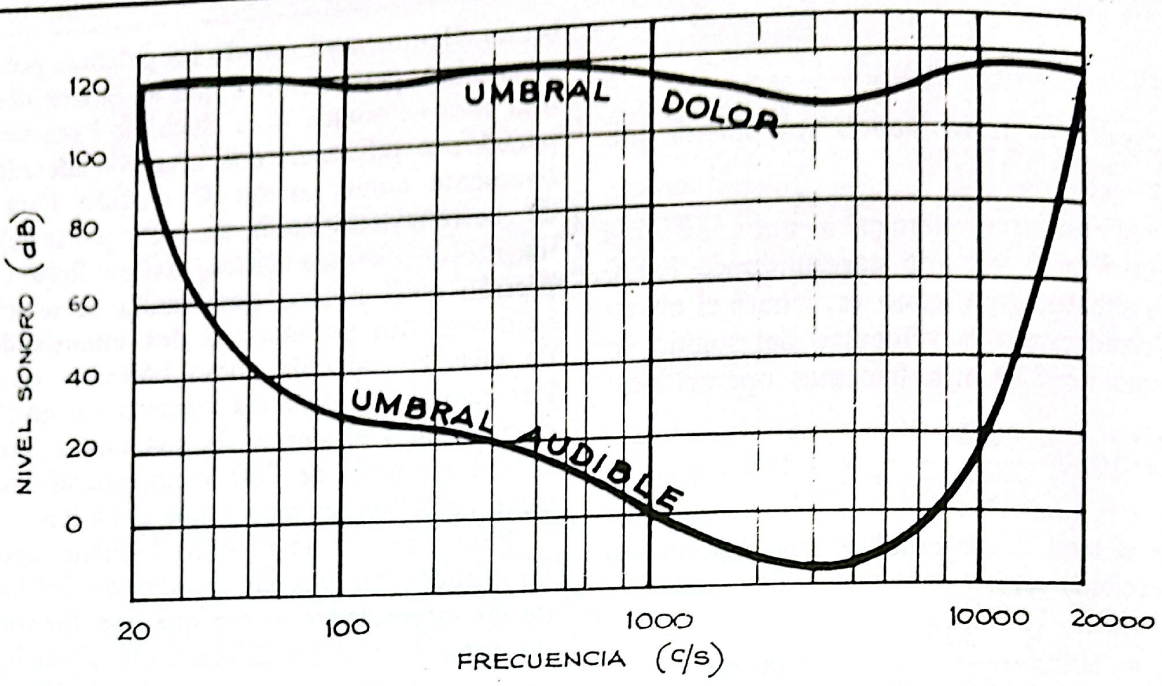


Fig. 153. – Gráfica de los niveles de audibilidad del oído humano.

una modalidad diferente. La primera conclusión es que el oído presenta menor sensibilidad para tonos graves y agudos, y mayor para la zona de frecuencias medias. En la terminología práctica de las técnicas del sonido esto se llama efecto *palangana,* por la forma que toma la curva. Es comprensible que los técnicos coloquen dispositivos correctores en los amplificadores de sonido para levantar los extremos de las curvas de potencia de salida de sus equipos y compensar así la deficiencia natural que presenta el oído humano. Hoy día vemos frecuentemente controles de graves y agudos en los amplificadores familiares, que están para el objetivo antes señalado.

Reverberación

Las ondas sonoras que parten de una fuente en todas direcciones tienen propagación rectilínea. Si encuentran paredes sólidas se reflejan en ellas y entonces, cuando el sonido se produce dentro de un recinto, pueden ocurrir reflexiones sucesivas, ya que hay varias paredes. Tomemos un salón (figura 154) y produzcamos un sonido breve; las ondas salen en todas direcciones, chocan contra las paredes, se reflejan y así sucesivamente. En la figura hemos tomado el recorrido parcial de dos ondas. Como el sonido tarda cierto tiempo en recorrer las distancias entre paredes, ocurrirá que ese sonido breve que emitimos se seguirá escuchando después de cierto tiempo de la emisión por efecto de las reflexiones sucesivas. Este fenómeno se llama *reverberación.*

Es fácil imaginar que para audiciones musicales la reverberación es un inconveniente, pues *estira* los sonidos. Por esta razón debe estudiarse el problema para aminorar ese efecto. Como se trata en esencia de un problema de reflexiones, se emplean materiales de revestimiento de paredes que absorban el sonido en lugar de reflejarlo.

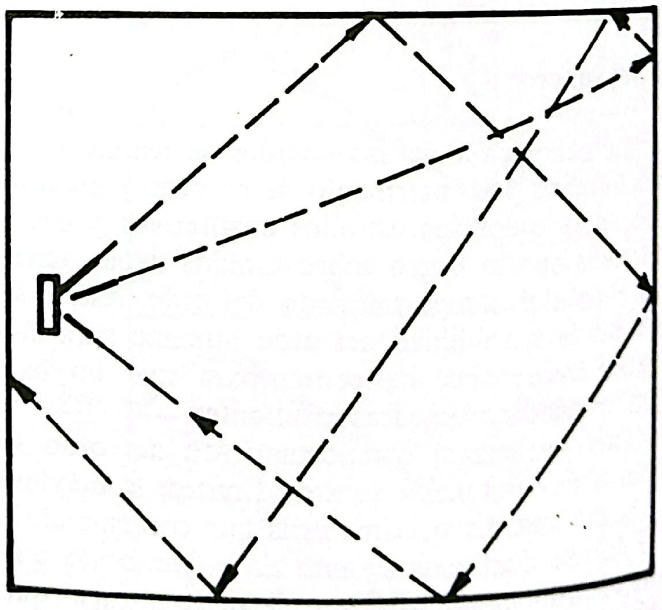


Fig. 154. – La reverberación que se produce en los salones.

Y eso vale también para pisos y techos, por lo cual es dable observar alfombrados, cortinados, materiales especiales de revestimiento, etc. La presencia del público en si es un paliativo pues la ropa es absorsora del sonido.

Día 13

La luz es también un fenómeno vibratorio, pero no siempre se lo consideró así, y su estudio puede hacerse adoptando las teorías existentes a través de las distintas épocas y que despertaron las polémicas más notables en la historia de las ciencias. Si la luz era un chorro de partículas o un fenómeno puramente vibratorio fueron las hipótesis en pugna hasta que, aparentemente en forma definitiva, se adoptó la teoría mixta. De todo eso nos ocuparemos en la jornada que ahora iniciamos, con la aclaración de que en el pasado se estudió la Optica, parte de la Física que se ocupa de la luz, sobre la base de la hipótesis aceptada en cada oportunidad. Y es que es tan vasto el temario que para muchas de las cuestiones a estudiar no interesa la naturaleza que tenga la luz, sino sus efectos. Basta citar la fotografía, el cine, la astronomía, la óptica médica, etc., para que pueda imaginarse la amplitud del tema, la cual deberá condensarse en la extensión que se ha podido dar al presente capítulo, que ya comenzamos.

ESTUDIO DE LA LUZ – OPTICA

Tal vez la luz sea el fenómeno físico que más polémicas ha despertado en el estudio de las ciencias. Las teorías enunciadas sobre su naturaleza fueron postuladas, descartadas por nuevas teorías, se volvía atrás y nuevamente adelante, todo ello debido a hechos y comprobaciones que no quedaban justificadas por la teoría aceptada en su época. Descartes fue el creador de la Optica geométrica, que atribuía a la luz el comportamiento de rayos rectilíneos. Según ese físico, la luz estaba formada por una lluvia de partículas que se propagaban en forma rectilínea; cuando chocaban con un objeto, éste las rechazaba produciendo la reflexión. Si el objeto era parcialmente penetrable por las partículas, la densidad del medio provocaba una desviación de las trayectorias rectilíneas y se producía la refracción. En los estudios actuales todavía se emplea la hipótesis de los rayos rectilíneos para encarar la parte de la Optica llamada *geométrica.*

La teoría granular de la luz explicaba la mayor parte de los fenómenos observables por el hombre, con los elementos disponibles en la época. Quedaba sin explicación el asunto de los colores de la luz, pero eso se atribuyó a ciertas propiedades del cuerpo emisor de luz.

Pero Newton, al encontrar la descomposición de un rayo de luz en varios rayos de diferentes colores, cuando el cuerpo emisor ya no está allí donde eso ocurre, ocasionó una polémica muy larga. La demostración se hace mediante un prisma de cristal, lo que veremos más adelante. Así surgió la teoría de que la luz era un fenómeno ondulatorio, o sea que está formada por ondas. El cuerpo productor de luz sufre vibraciones y las mismas se propagan en forma rectilínea, algo parecido a lo que vimos para el sonido.

Pero entonces, ¿cómo se propagaba la luz en el vacío, fuera de la atmósfera, ya que nos llega la luz del sol? Huyghens propuso la teoría de que todo el universo está lleno de un medio o sustancia ténue a la que llamó *éter* y que permitía la propagación de la luz como una vibración de las partículas del éter. La composición y descomposición de un rayo de luz era un fenómeno de interferencia de ondas y ello explicaba el espectro luminoso de Newton.

Pero Einstein encuentra un fenómeno que lesiona a la teoría ondulatoria; ciertas sustancias emiten cargas eléctricas al recibir un rayo de luz y la energía de esas cargas depende de la frecuencia de la onda luminosa, o sea de su color. Este fenómeno se llama fotoeléctrico y lo conocemos por las células fotoeléctricas que se usan para hacer abrir puertas o poner en marcha escaleras mecánicas. Claro, el corpúsculo viajero de la teoría granular explicaba el fenómeno fotoeléctrico pero no la dispersión y la polémica fue resuelta por De Broglie, premio Nóbel de 1927, que estableció la teoría mixta, o sea que la luz es una onda asociada a corpúsculos llamados *fotones* que viajan; no se necesita inventar el éter y

quedan justificados todos los fenómenos conocidos, ¡hasta el momento!

Así las cosas podemos realizar el estudio de la Optica desde el punto de vista de la propagación de rayos rectilíneos, no interesando que los mismos sean una serie de corpusculos con energía propia. Por otra parte se estudiarán los fenómenos ondulatorios de la luz, y entonces intervendrá la onda asociada a los fotones; tenemos la vibración y la propagación y con ellas podemos encarar los temas de este capítulo.

Fuentes de luz

La teoría de los corpúsculos energizados exige que la luz aparezca como una transformación de energía y entonces para emitir luz necesitamos alguna forma de energía a transformar. Si calentamos un cuerpo le entregamos calor y si le seguimos entregando calor su temperatura se elevará hasta alcanzar el estado de incandescencia que emite luz. Por ejemplo, al quemar un combustible se producen llamas y las mismas emiten luz. Si hacemos pasar una corriente eléctrica por un alambre metálico, se puede lograr el estado de incandescencia y se producirá luz. Si se encierra un gas en un tubo y se provocan choques violentos entre sus moléculas, puede alcanzarse también el estado de incandescencia en el gas y se emitirá luz.

Así, en forma suscinta hemos definido los tres tipos de focos de luz más conocidos: los de llama, los de alambre incandescente y los de gas fluorescente. Claro, en cada caso se requieren ciertas condiciones para lograr la producción de luz. Por ejemplo, un alambre de cobre expuesto al aire y recorrido por una corriente eléctrica se fundirá al alcanzar el estado de incandescencia, pero un hilo delgado de tungsteno, colocado en una ampolla al vacío, emitirá luz, y hemos descripto las lámparas eléctricas.

Fotometría

Cuando se habla de un fenómeno físico, y la luz es uno de ellos, surge de inmediato la necesidad de medirlo, de establecer magnitudes de referencia; cada magnitud requiere una definición y una unidad de medida, la primera obedeciendo al concepto físico y la segunda a razones prácticas. En el caso de la luz hubo una evolución en las mismas, a medida que se desentrañaba el misterio sobre su naturaleza. La primera preocupación fue la de establecer patrones de luz o sea de cantidad de luz y para ello se idearon fuentes luminosas primarias, a las que se dio el nombre de *bujías*. Por ejemplo, una vela de parafina de 20 mm de diámetro, con llama de 50 mm de longitud es una *bujía patrón*. Pronto se advirtió que una fuente de tal naturaleza acusaba una imprecisión inaceptable y se adoptó posteriormente la *bujía internanal NK;* se la define como la sesentaava parte de la luz emitida por un centímetro cuadrado de un cuerpo negro radiante a la temperatura de fusión del platino (1768 °C). Otra bujía patrón es la de *Hefner Altenek*, que se obtiene con una lámpara de acetato de amilo, con mecha de 8 mm de diámetro y llama de 40 mm de largo; esta bujía se designa *HK*.

Los patrones de luz se usaron hasta que se determinó la necesidad de fijar mejores definiciones. En efecto, la cantidad de luz que emite un foco puede ser considerada en su totalidad, la que sale del mismo en todas direcciones, o en una dirección determinada. Se convino diferenciar ambos conceptos denominando *flujo luminoso* a la cantidad total de luz que emite el foco. Claro, si imaginamos al foco como un punto que emite luz y que está colocado en el centro de una esfera transparente, el flujo luminoso F será la cantidad total de luz que atraviesa la superficie esférica. La unidad para medir el flujo luminoso se llamó *lumen*.

Ahora podemos hablar de la otra magnitud que interesa y es la intensidad luminosa I del foco. Para ello observemos la figura 155 en la que vemos

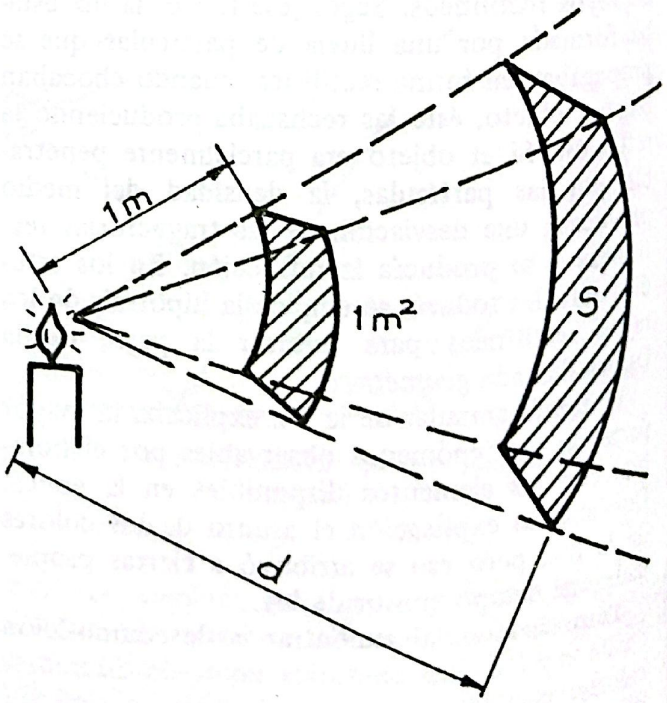


Fig. 155. – Concepto geométrico de la intensidad luminosa emitida por un foco.

un foco que emite luz. Tomemos una esfera transparente de un metro de radio y dibujemos sobre la superficie de la misma una superficie de un metro cuadrado; la cantidad de luz que atraviesa esa superficie marcada mide la intensidad luminosa del foco y su unidad es la *bujía*. Es decir que se ha tomado como unidad de la intensidad luminosa el nombre de la unidad que mencionamos antes para medir la luz de un foco; tenemos ahora precisado el concepto. Retomemos la figura 155; la superficie de la esfera vale:

$$S = 4\ \pi\ r^2$$

y siendo el radio r igual a un metro, la superficie vale 12,56 m^2, es evidente que si el foco luminoso tiene una bujía el flujo total emitido será de 12,56 lúmenes. El flujo luminoso representa una potencia y puede relacionarse con las unidades de potencia que tiene la energía que se transforma para producir luz. Por ejemplo, en Electricidad la potencia se mide en Watt, y entonces, en las lámparas eléctricas podemos relacionar la potencia o flujo luminoso en lúmenes con la potencia eléctrica consumida por la lámpara, tomada en Watt, dando la cifra de lúmenes/Watt.

Pasemos ahora a la tercera magnitud importante. Examinemos la figura 155 y comprenderemos que si nos alejamos del centro, la cantidad de luz que llega a una superficie esférica S, que corresponde a la de un m^2 tomada a un radio de un metro, es la misma, ya que la luz que sale del foco llega a S. Pero esa luz debe repartirse en una superficie mayor. ¿Qué relación hay entre S y la superficie unitaria? Precisamente el cuadrado de la distancia al centro, que llamamos d; claro, la superficie de la esfera es proporcional al cuadrado del radio.

Entonces, la iluminación de la superficie S o sea la cantidad de luz que se repartirá sobre ella, quedará más difundida, o sea habrá menos luz por unidad de superficie y tanto menos como el resultado de dividir por el cuadrado de la distancia d al centro luminoso. Entonces, se llama *intensidad de iluminación* sobre una superficie, al cociente:

$$E = \frac{I}{d^2}$$

O sea al cociente entre la intensidad luminosa I del foco y el cuadrado de la distancia entre la superficie considerada y el foco. La intensidad de iluminación se mide en *lux*.

También puede expresarse la intensidad de iluminación en función del flujo luminoso que incide sobre una superficie S poniendo:

$$E = \frac{F}{S}$$

Desde que el flujo F que emite el foco debe repartirse en la superficie iluminada S. Y desde que el flujo se mide en lúmenes y la superficie en m^2, resulta para la intensidad luminosa (lux) la unidad lumen/m^2.

Fotómetros

Para comparar focos luminosos, cosa que se hace necesaria para determinar la cantidad de bujías que emite un foco desconocido al compararlo con la bujía patrón, se acude a aparatos llamados *fotómetros*. El más simple es el de Bunsen, esquematizado en la figura 156. Consta

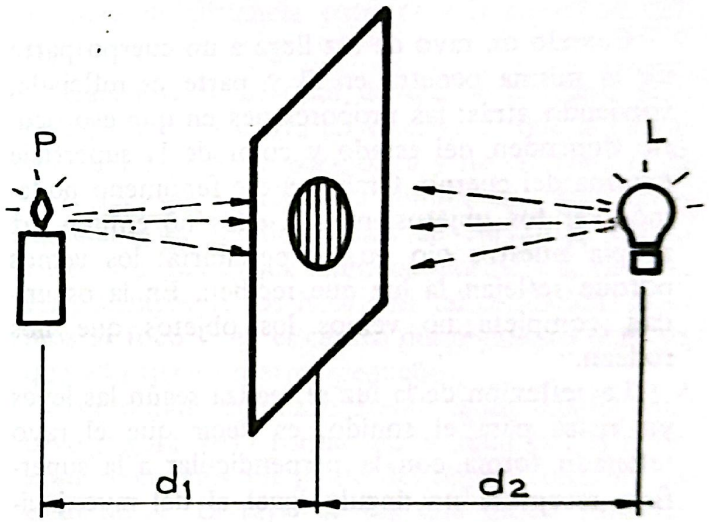


Fig. 156. Principio del fotómetro de Bunsen.

de una pantalla opaca de papel en la cual una mancha de grasa o parafina hace un círculo semitransparente. De un lado se coloca la lámpara patrón P y del otro la lámpara o foco en estudio L. Si se observa la iluminación sobre la mancha comparada con la que la rodea a ambos lados de la pantalla, desplazando L se logrará igualar las dos iluminaciones, que es cuando no vemos más la mancha. En ese momento aplicamos la definición de intensidad de iluminación antes vista:

$$\frac{P}{d_1^2} = \frac{L}{d_2^2}$$

donde P y L son las intensidades luminosas de los dos focos. De esta fórmula podemos calcular la intensidad L si conocemos las otras tres cantidades, que salen del fotómetro y del foco patrón, digamos una bujía HK, por ejemplo.

La igualdad anterior nos sirve para decir que las intensidades luminosas están en relación con los cuadrados de las distancias, para producir igual efecto, o sea igual iluminación sobre un plano dado. Otros fotómetros tienen diferentes montajes pero siempre se trata de comparar una fuente o foco patrón con el foco desconocido.

Otro aparato muy usado en verificaciones de iluminación es el luxómetro. Se basan en la propiedad de ciertas sustancias de producir una corriente eléctrica al recibir luz, de modo que tienen una placa de tales sustancias y un indicador de corriente, de tal manera que la medida de la corriente indicada por la aguja en la escala da lecturas directas de intensidad de iluminación en el lugar donde se coloca, en lux.

Reflexión de la luz

Cuando un rayo de luz llega a un cuerpo parte de la misma penetra en él y parte es reflejada, volviendo atrás; las proporciones en que eso ocurre dependen del estado y color de la superficie externa del cuerpo. Gracias a ese fenómeno podemos ver los objetos, pues si ellos no emiten luz propia nuestro ojo no los percibiría; los vemos porque reflejan la luz que reciben. En la oscuridad completa no vemos los objetos que nos rodean.

La reflexión de la luz se realiza según las leyes ya vistas para el sonido, es decir que el rayo reflejado forma con la perpendicular a la superficie receptora un ángulo igual al del rayo incidente (figura 157). Por supuesto que esto es fácil de comprobar cuando la superficie reflectora es un plano y no absorbe una parte importante de la luz; si enviamos el haz de una linterna sobre una pared blanca comprobaremos que se refleja según la ilustración de la figura 157, pero si lo enviamos sobre una pared negra, no comprobaremos la reflexión porque el rayo es absorbido por la pared. Además, si la luz incide sobre un cuerpo irregular, se producen reflexiones múltiples y la luz se difunde en todas direcciones; cada rayo que integra el haz incidente encuentra un pequeño plano reflector que refleja ese rayo y todos los planitos tienen diferentes inclinaciones unos respecto de los otros, por lo cual no hay haz de salida sino multitud de ellos.

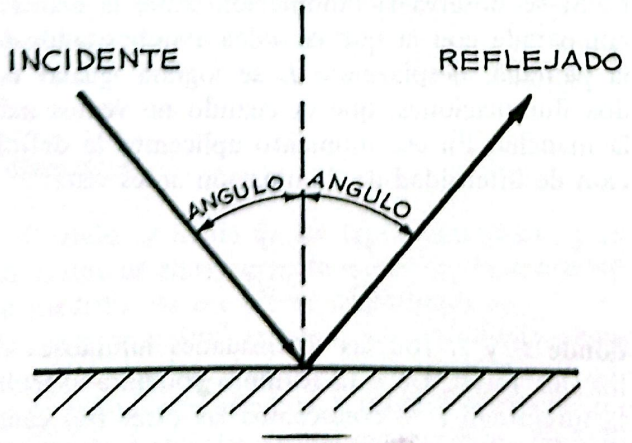


Fig. 157. – En la reflexión de la luz los ángulos de incidencia y de reflexión son iguales.

Una placa de metal bien pulido es un excelente plano reflector y en el pasado se usaron placas de ese tipo como espejos. Posteriormente se encontró que, si bien el cristal es transparente, cubriendo una de sus caras con una substancia metalizada con mercurio, se producía la reflexión total de la luz y así surgieron los actuales *espejos.*

Espejos planos

Si colocamos un objeto apoyado en un espejo plano (figura 158), la luz que llega a su extremo

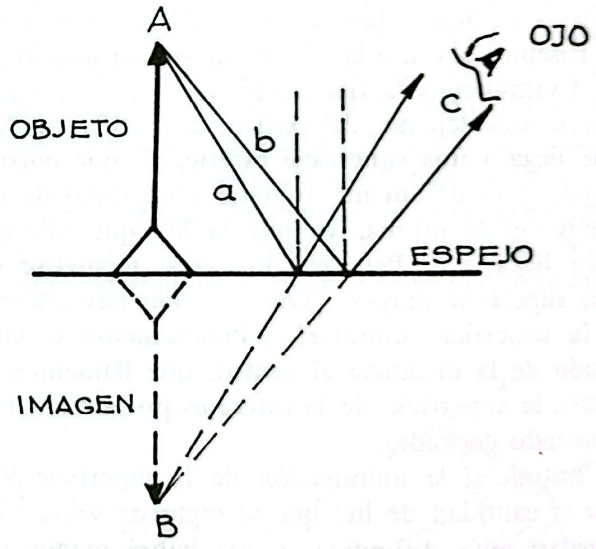


Fig. 158. – La imagen se ve del otro lado del espejo por prolongación de los rayos reflejados.

A forma multitud de rayos, de los cuales algunos llegan al ojo del observador por reflexión en el espejo. La impresión que recibe éste es que esos rayos provienen de un punto *B* dentro del espejo, que es el punto donde convergen los rayos divergentes de la reflexión, en una supuesta prolongación. En efecto, para cumplir con la ley de la reflexión, el rayo *a* forma un ángulo de salida y el *b* otro y al reflejarse llegan al punto *C*, ojo del observador, en forma divergente, o sea abriéndose o separándose entre si. Si prolongamos los rayos reflejados hacia adentro del espejo ellos concu-

rirán al punto *B* que, por razones geométricas, es simétrico con el *A*. Si hacemos la misma construcción con otros puntos del objeto formaremos dentro del espejo una imagen igual a la del objeto, pero invertida en su posición. Esta imagen que aparenta estar dentro del espejo se llama *virtual*.

No es necesario que el objeto apoye en el espejo, pues en la figura 159 hemos puesto un

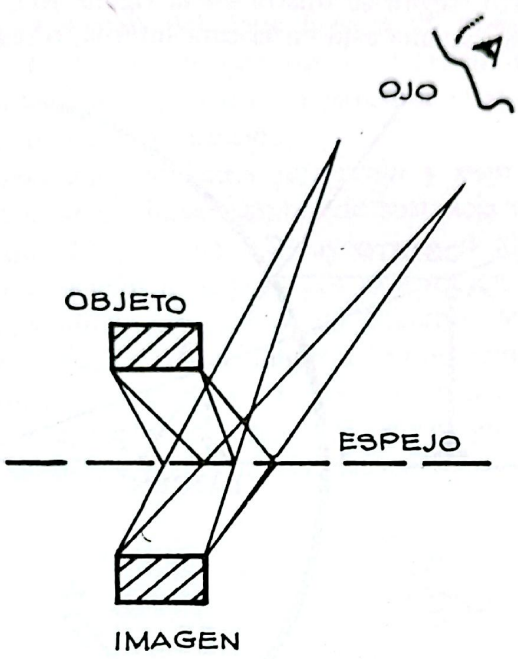


Fig. 159. – Un objeto se reproduce detrás del espejo formando su imagen.

objeto alejado del espejo y hecha la construcción geométrica de los rayos para dos puntos del mismo; continuando los dibujos para todo el objeto se encontraría la imagen igual a la del objeto, imagen virtual.

Hemos definido a la imagen virtual, como la que se forma dentro del espejo, y que para ser vista el observador debe colocarse delante del espejo, y dentro del cono que forman los rayos reflectores extremos. En contraposición, una imagen *real* es la que se forma sobre un plano por proyección y puede ser observada desde cualquier parte. En otras palabras, la imagen real está situada delante del plano y la virtual está ubicada detrás del mismo; esto vale para los espejos, pues veremos que es distinto en los cuerpos transparentes.

Espejos esféricos

Si se toma un globo de cristal y se corta una parte del mismo, se tendrá un casquete; cubriendo una de sus caras con *amalgama* para convertirla en un espejo, tendremos lo que se llama espejo esférico. Si la cara cubierta es la externa, el espejo es *cóncavo* y si es la interna, el espejo es *convexo*.

En la figura 160 mostramos en corte un espejo cóncavo, con la cara amalgamada a la derecha; luego, este espejo debe observarse desde la izquierda. El punto *O* es el centro de la esfera de la cual el espejo formaba parte y recibe el nombre de *centro óptico*. Un rayo de luz que llega al espejo se refleja formando un ángulo igual al de incidencia con respecto a la perpendicular a la superficie. Pero esta última es la tangente a la circunferencia y todas las tangentes son perpendiculares al radio, de modo que cualquiera que sea el rayo que llegue, la perpendicular a ese punto pasa por *O*. Si el rayo que llega a un punto cualquiera *A* es paralelo al eje, el rayo reflejado va a un punto *F* llamado *foco*, ubicado a mitad de distancia entre *O* y la superficie del espejo.

Hacemos la salvedad de que esta última afirmación sólo es cierta en el caso de que la curvatura del espejo sea parabólica y no esférica; en el caso del espejo esférico se cumple en forma aproximada para grandes radios de curvatura. Como en el uso de espejos esféricos (cosmética, cirugía, etc.) siempre se los hace con tal condición, dejamos al foco *F* en el centro del segmento *O B*, ya que ello tiene un error pequeño.

Un objeto colocado frente a un espejo cóncavo (figura 161) forma una imagen por la reflexión. Tomemos un punto del objeto como ser su extremo *A*. El rayo de luz que incide paralelamente al eje, sobre el espejo, es el *A B*; su reflexión pasa por el foco *F*. El rayo de luz directa que sale de *A* y que pasa por el centro óptico *O* corta al anterior en el punto *C*. Para el observa-

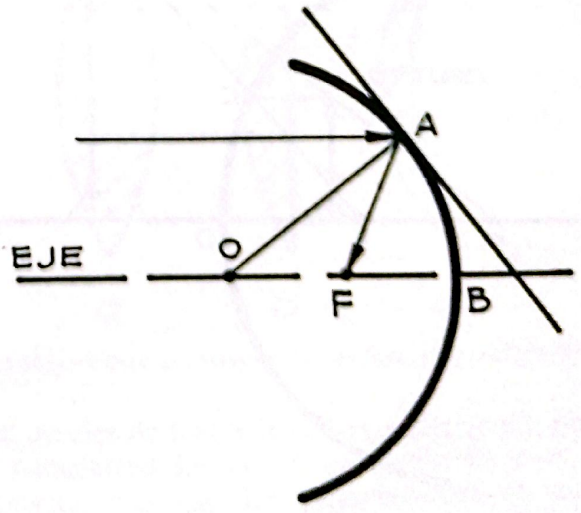


Fig. 160. – Puntos característicos en el espejo esférico.

dor, la imagen del punto *A* la ve en *C*. Y procediendo así con otros puntos del objeto formaremos su imagen completa.

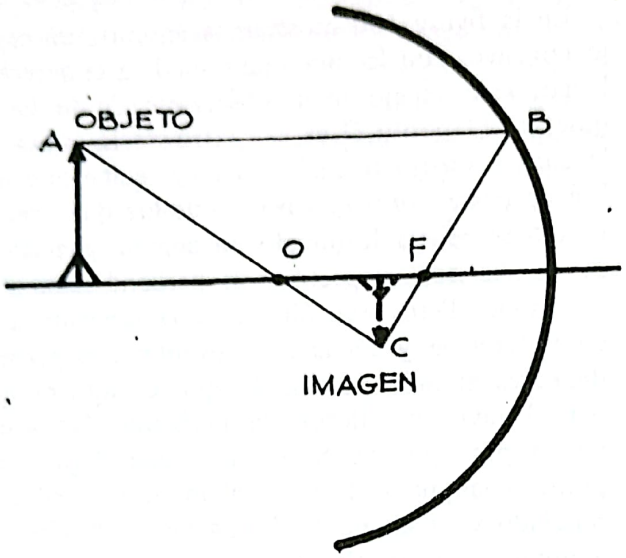


Fig. 161. Formación de la imagen de un objeto distante en el espejo cóncavo.

La imagen en un espejo cóncavo, cuando el objeto está colocado más lejos que el foco *F*, es real, invertida y de menor tamaño que el objeto. Para el caso que el objeto esté colocado en la posición del centro *O*, la imagen tendrá igual tamaño que él; y si el objeto se coloca entre *O* y *F*, el tamaño de la imagen supera al del objeto, pero siempre serán imágenes reales e invertidas.

Si colocamos el objeto más adentro que el foco *F* (figura 162), y hacemos la construcción anterior, se obtiene lo siguiente: el rayo directo que pasa por *O* y por *A* se prolonga imaginariamente dentro del espejo. El rayo que incide en el punto *C*, paralelamente al eje, se refleja y pasa por el foco *F*; su prolongación imaginaria dentro del espejo corta al anterior en el punto *B*, que será la imagen virtual del *A*. Y comprobamos que la imagen es virtual, derecha (no invertida) y mayor que el objeto. Esto es válido para posiciones del objeto comprendidas entre *F* y *D*.

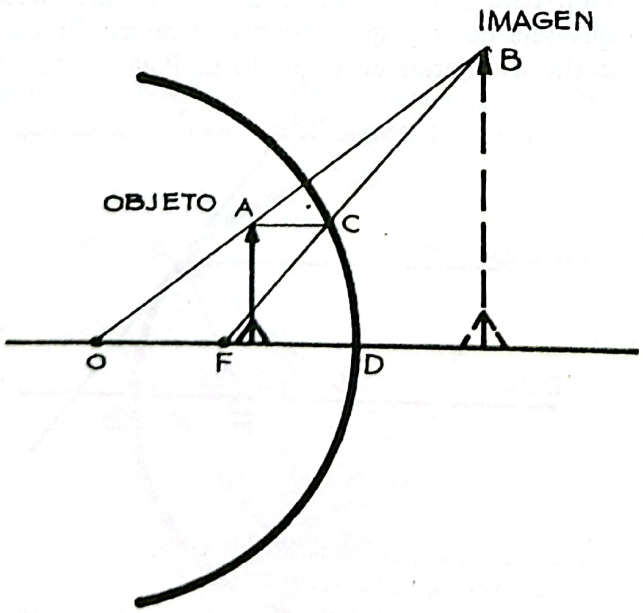


Fig. 162. Formación de la imagen de un objeto cercano en el espejo cóncavo.

Tomemos ahora el caso de los espejos *convexos*, según se ilustra en la figura 163. En ellos la amalgama está en la cara interna, o sea la de la

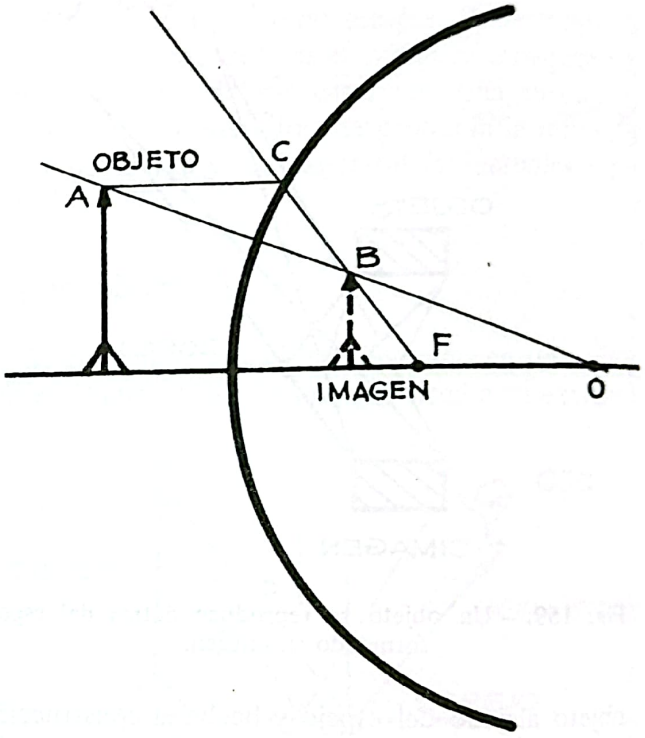


Fig. 163. Formación de la imagen en un espejo convexo.

derecha en la figura y el observador se coloca a la izquierda. Para encontrar la imagen de un objeto hagamos la construcción antes propuesta. Trazamos un rayo directo que pasa por *A* y pasa por el centro *O*, que será imaginario dentro del espejo. Otro rayo, paralelo al eje llega a *C* y se refleja pasando por el foco *F*; este rayo corta al anterior en el punto *B* que da el extremo de la imagen. Vemos que la imagen es virtual, derecha y menor que el objeto.

Retracción de la luz

Una experiencia que seguramente los lectores han vivido es la observación de una varilla sumergida con inclinación en el agua (figura 164); da la impresión de que la varilla está doblada o quebrada. Como la visión se produce merced a rayos luminosos que parten desde todos los puntos

externos del objeto por reflexión de la luz recibida, este fenómeno tiene origen en una desviación de los rayos luminosos. Veamos.

La varilla real es *A B* y uno de sus puntos como el *C* el observador lo ve en su posición real. Otro punto como el *D* tiene un rayo luminoso de reflejo que sale de él y va hacia el observador, pero al llegar a la superficie del agua sufre una desviación y llega al ojo. Prolongando el rayo *F O* dentro del agua llega a un punto imaginario *E* que da imagen irreal de la varilla. Para el observador la varilla no pasa por *D* sino por *E* aunque eso sea ilusorio.

Este fenómeno se llama *refracción* y ocurre cuando el rayo luminoso cambia de sustancia de propagación. El paso de los rayos por el aire cambia la dirección a su paso por el agua, en el caso comentado y son medios de diferente densidad. En la figura 165 se muestra lo que ocurre cuando un rayo luminoso atraviesa una placa de cristal, por ejemplo, material más denso que el que hay delante y detrás de esa placa. Delante de

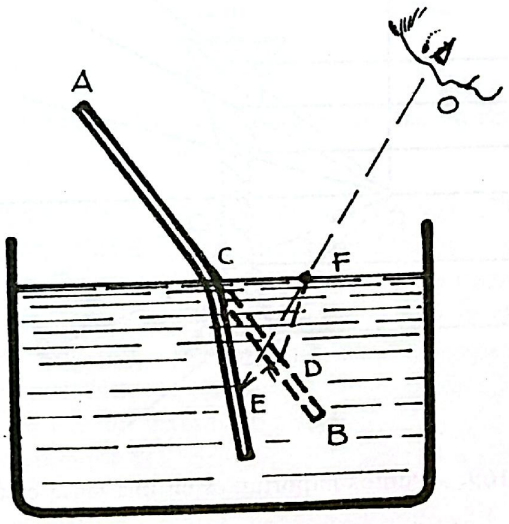


Fig. 164. Por el fenómeno de refracción la vara se ve quebrada.

la placa hay una sustancia o medio *A* y el rayo incide en la placa formando un ángulo *a* con la perpendicular a la misma. Al entrar en la placa sufre una desviación por refracción, y se propaga formando un ángulo *b*. Al salir de la placa de densidad *B* pasa a un medio *C* de diferente densidad y sufre otra refracción, por lo que sale formando un ángulo *c*.

Hay dos leyes que gobiernan el proceso geométrico de la refracción. La primera dice que si los medios *A* y *C* son iguales, el ángulo *a* y el *c* son iguales; es decir que el rayo sale con la misma dirección con que llegó a la placa, solo que desviado paralelamente. La otra ley define el llamado *índice* de refracción entre dos sustancias,

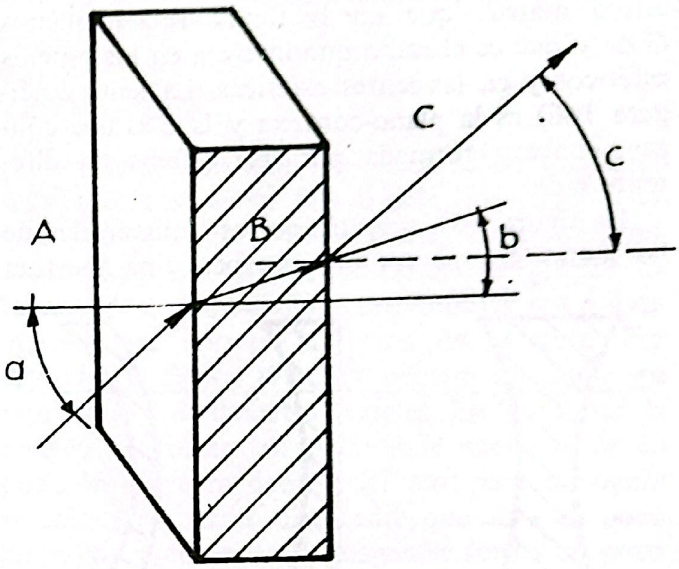


Fig. 165. Refracción de un rayo luminoso a través de una lámina transparente.

conociendo los ángulos de entrada y salida; ese índice está dado por el cociente de los senos trigonométricos de esos dos ángulos. Es decir que si se conocen los ángulos *a* y *b*, se busca en una tabla trigonométrica los valores de los senos de los mismos, los dividimos y el resultado nos da el índice de refracción del cristal *B*.

Lentes esféricas

Una de las aplicaciones más importantes de la refracción son las lentes, láminas curvadas de cristal en forma de discos cuyas caras están próximas y no son paralelas. Lo más común es que las caras sean de forma esférica o una esférica y otra plana. La figura 166 muestra en corte los tres

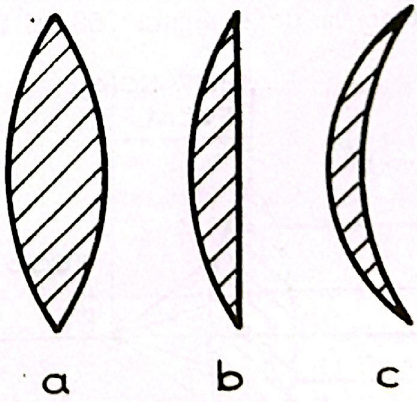


Fig. 166. Corte transversal de las lentes convergentes.

tipos usuales de lentes llamadas *convergentes* porque concentran los rayos luminosos. La *a* es la biconvexa, con sus dos caras esféricas de igual radio de trazo; no se confunda el radio del disco que forma la lente con el radio de trazo de la

esfera matriz, que en la figura 160 llamamos *O A*, y que es el radio que interesa en los espejos esféricos y en las lentes esféricas. La lente *b* (figura 166) es la plano-convexa y la *c* es una cóncavo-convexa formada por dos esferas de diferente radio.

La figura 167 muestra cortes transversales de las lentes *divergentes* por provocar una abertura

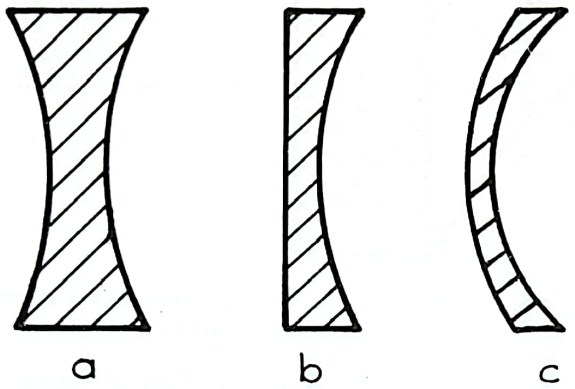


Fig. 167. – Corte transversal de las lentes divergentes.

de los haces luminosos. La *a* es la bicóncava, la *b* es la plano-cóncava y la *c* es la convexo-cóncava, parecida a la tercera lente de la figura anterior, sólo que en aquella el radio de la cara delantera es menor que el de la trasera y en el caso presente ocurre a la inversa.

La refracción produce desviaciones en los rayos luminosos que llegan a las lentes y la atraviesan, excepto para el rayo que pasa por el centro geométrico *O* llamado centro óptico; todo rayo que pase por *O* continúa su trayectoria rectilínea sin desviación. En la figura 168 se indica ese centro óptico y vemos también que los rayos paralelos al eje se refractan y convergen a un punto *F* llamado *foco*. En las lentes convergentes, como la de la figura 168, el foco está

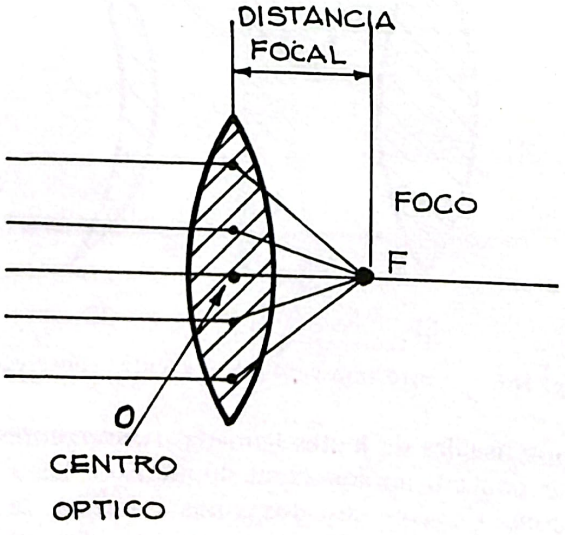


Fig. 168. – Puntos importantes en una lente biconvexa.

ubicado en el lado opuesto a la incidencia de los rayos. Claro, si suponemos rayos que llegan desde la derecha, habrá otro foco ubicado en forma simétrica con respecto a *F*, es decir que las lentes tienen dos focos que, si la lente es simétrica (figura 166 a y figura 167 a) estarán ubicados a la misma distancia de *O*.

En la figura 169 vemos una lente divergente, donde el foco *F* se encuentra prolongando los rayos refractados hacia atrás; es decir que los rayos de luz que llegan por la izquierda se refractan abriéndose y se pierden hacia la derecha, pero la prolongación de los mismos hacia atrás pasa por un punto *F* que es el *foco*. También habrá otro foco simétrico con *F* para el caso de rayos que lleguen desde la derecha. En ambas figuras, la 168 y 169, se indica la llamada *distancia focal O F* muy importante para calificar a

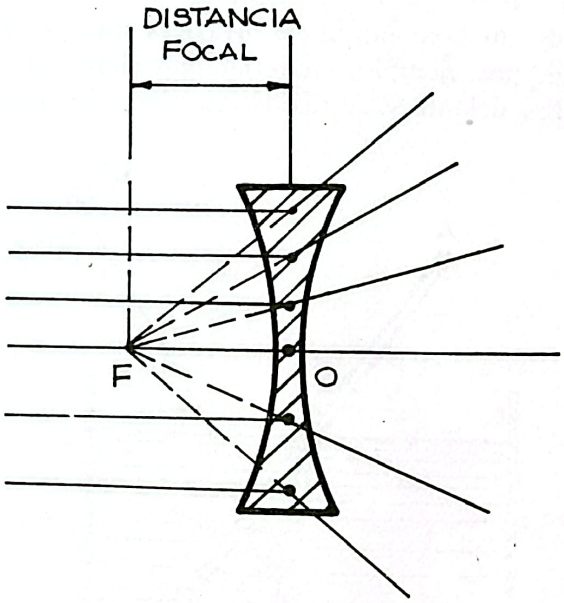
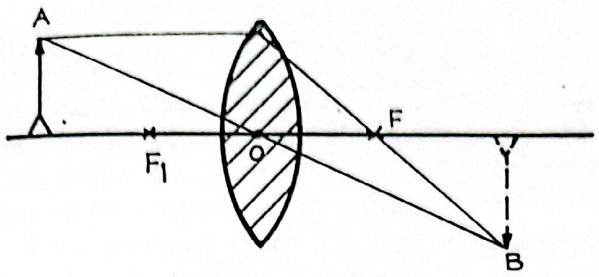


Fig. 169. – Puntos importantes en una lente bicóncava.

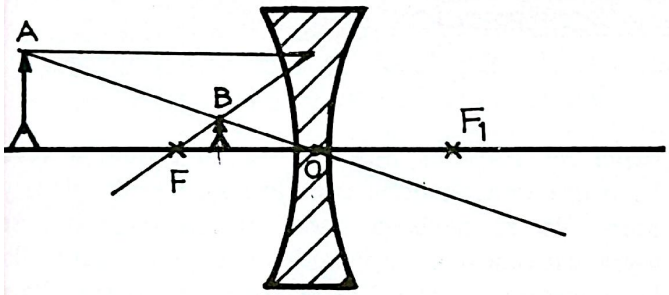
una lente; o sea que es la distancia entre el foco y el centro óptico.

¿Cómo vemos los objetos a través de una lente? Tenemos que hacer una composición geométrica para encontrar la imagen de un objeto, en forma similar a lo que hicimos para los espejos esféricos. Tomemos una lente convergente del tipo biconvexa, como se ve en la figura 170 y dibujemos un objeto cuyo extremo es *A*. Siguiendo el mismo procedimiento de tomar dos rayos, uno que pase por el centro *O* y otro que incida paralelamente al eje y que al refractarse pasará por el foco, encontramos el punto *B* extremo de la imagen. La lente biconvexa da imagen real e invertida. Decimos real porque colocando una pantalla detrás de la lente se formará en ella la imagen.



ig. 170. – Formación de la imagen en una lente biconvexa.

En el caso de la lente divergente del tipo icóncava, la construcción por los dos rayos tíicos la vemos en la figura 171 y nos da una nagen virtual y derecha. Como es virtual no uede recogerse sobre una pantalla pero podemos erla a través de la lente.



ig. 171. – Formación de la imágen en una lente bicóncava.

Obsérvese de paso que en las figuras 170 y 71 se han marcado los focos simétricos o conugados de F con la letra F_1. Sirven para hacer la onstrucción cuando la luz incide desde la derecha. Pero hay un caso en que debe usarse y es uando el objeto, en la lente divergente, se enuentra colocado entre el foco y la lente, tal omo lo muestra la figura 172. El objeto a obser-

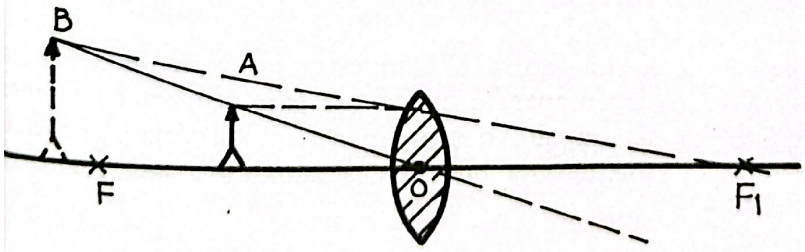


Fig. 172. – En la lente biconvexa la imagen se traza mediante el foco conjugado cuando el objeto está muy cerca.

var está en A y por su extremo trazamos los dos ayos que nos permiten encontrar la posición de a imagen; tenemos: por el extremo A trazamos el rayo que pasa por el centro óptico O y el que ncide perpendicularmente a la lente y que se refracta pasando por el foco, que en este caso es el conjugado F_1; los dos rayos se encuentran en el punto B que es una imagen virtual por formarse con la prolongación de los rayos. Además la imagen no resulta invertida como en la figura 170, sino derecha.

Lentes médicas

Las lentes se usan en física solas, formando combinaciones entre dos o más tipos diferentes, etc. Las máquinas fotográficas, largavistas, microscopios, etc, son aplicaciones de grupos de lentes. Pero también son importantes sus aplicaciones para corregir defectos de la vista. Por ejemplo, la figura 173 nos muestra los dos casos más clásicos de defectos visuales. En la *miopía*, la imagen se forma un poco más adelante de su posición correcta dentro del ojo; para corregirla se coloca una lente divergente que abra un poco los rayos y entonces la imagen se forma un poco más atrás, en el punto correcto. En la *presbicia*, la imagen se forma más atrás de lo correcto; se corrige con una lente convergente, de manera que cierre un poco los rayos y adelante el punto de imagen dentro del ojo hasta su posición correcta.

En la práctica se ha convenido en llamar *poder dióptrico* a la relación o cociente entre el índice de refracción y la distancia focal. La unidad adoptada para esa magnitud es la *dioptría*. Por ejemplo, si hacemos el índice de refracción del aire igual a la unidad, una lente con distancia focal igual a un metro, colocada en el aire, tiene un poder dióptrico de una dioptría; otra con distancia focal de 50 cm tiene dos dioptrías, etc. En el caso de las lentes para miopía y presbicia, las recetas especifican el número de dioptrías negativas y positivas, respectivamente, que debe tener la lente para corregir el defecto, tal como se mostró en la figura 173.

Las lentes presentan defectos, entre los cuales los más conocidos son la *aberración esférica* y el *astigmatismo*. En las lentes esféricas, los rayos que pasan por los bordes van a un foco que no coincide con el que corresponde a los rayos próximos al eje, produciendo una deformación de la imagen, esto es la aberración. El astigmatismo consiste en que las líneas horizontales y las verticales del objeto no guardan su perpendicularidad en la imagen. Para corregir la aberración esférica hay que limitar el campo visual de la

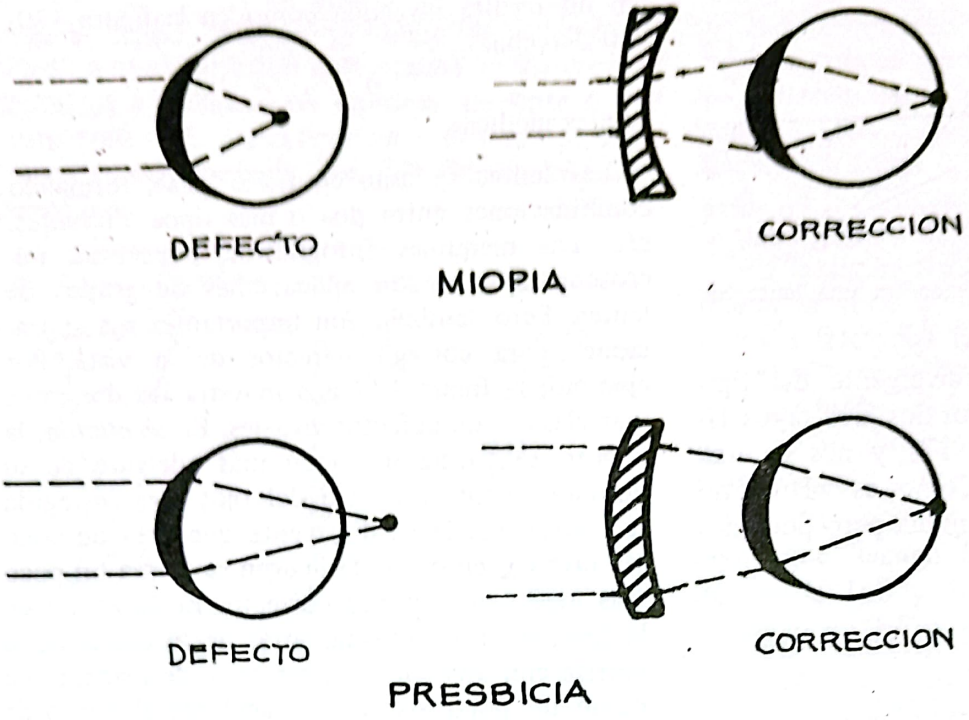


Fig. 173. – Los dos principales defectos ópticos del ojo y su corrección.

lente y para corregir el astigmatismo hay que combinar adosando lentes de defectos opuestos, formando las que se llaman *anastigmáticas.*

La cámara fotográfica

Esencialmente, una cámara para tomar fotografías consiste (figura 174) en una caja cerrada

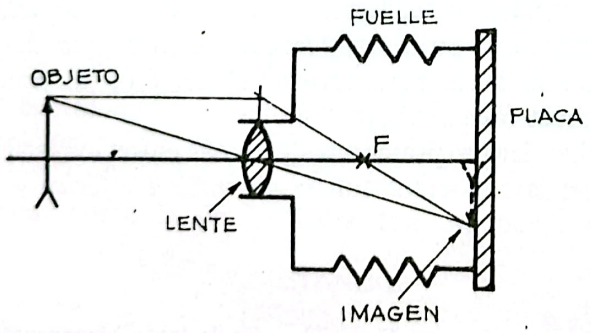


Fig. 174. – Corte esquemático de una cámara fotográfica.

cuya longitud puede ser regulada y que tiene una lente convergente en el centro de la cara frontal. En la cara opuesta a la lente se coloca una placa o película sensibilizada a la luz, en la que los rayos de ésta destruyen parte de la película sensible, en correspondencia con la forma del objeto a fotografiar. Fijando por medios químicos los restos de la sustancia sensible de la placa se tiene una imagen negativa del objeto, esto es, los blancos son negros y los negros son blancos.

Haciendo la construcción por los dos rayos típicos tomando el extremo del objeto, en la placa se formará una imagen invertida y real. Pero esa imagen debe caer justo sobre la placa y para ello se necesita hacer el *enfoque*, que se logra estirando o acortando la cámara; para ello las paredes laterales tienen forma de fuelle. Para saber cuándo el enfoque está logrado, se observa la imagen a través de la transparencia de la placa, evitando que la luz incida desde afuera sobre la misma; es conocido el paño de los fotógrafos para tal objeto. En las máquina modernas la observación se hace a través de un visor y el enfoque se hace desplazando la lente mediante la rosca que tiene el tubo que la sujeta. La lente en las cámaras fotográficas se llama *objetivo.*

La cámara proyectora

La figura 175 muestra un corte esquemático de un aparato que se usa para proyectar imágenes de un objeto sobre una pantalla alejada, generalmente una tela blanca adosada a una pared. El

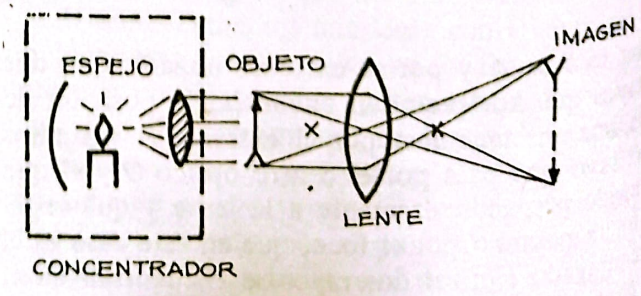


Fig. 175. – Corte esquemático de una cámara de proyección de imágenes.

objeto está impreso en una lámina transparente para que la luz pase por las zonas blancas únicamente, y como la figura está en negativo, la proyección reproducirá el objeto real, en positivo, como era antes de tomar una placa fotográfica en negativo.

La cámara proyectora tiene una fuente de luz de tal tipo que sea de la mayor intensidad y menor tamaño posible, para lograr que los rayos salgan de lo que puede considerarse un punto luminoso. Para aprovechar los rayos que van hacia atrás, se coloca un espejo esférico o mejor parabólico. Así se obtiene rayos paralelos al eje. Delante del foco hay una lente convergente llamada *concentrador*, que tiene por objeto refractar los rayos para hacerlos paralelos al eje y enviarlos a la placa con la figura a proyectar, figura a la que llamamos *objeto*. Delante del mismo hay una lente convergente colocada a mayor distancia que la focal para lograr una imagen real y a menor distancia que el doble de la focal para que se produzca aumento de tamaño. Las placas negativas a proyectar suelen llamarse *diapositivas*.

La cinematografía

El ojo humano tiene un defecto que resultó una ventaja para muchos adelantos cientfíficos: es la *persistencia visual*. Debido a ella una imagen formada en la retina no se borra de inmediato sino que persiste durante un lapso de un décimo de segundo aproximadamente. De tal modo, si se toman fotografías sucesivas de una escena en movimiento a intervales menores que el señalado, y luego se proyectan en forma también sucesiva, el ojo verá el movimiento. Pero para ello hay que ponerle delante cada foto, y el cambio de fotos debe ser brusco, rápido.

A tal efecto la cámara cinematográfica usa una película de celuloide en la cual, por sensibilización, se grabaron las fotografías sucesivas. Esa película se hace pasar por un tambor, el cual tiene unos pernos salientes que calzan en unas perforaciones laterales de la película para hacerla avanzar. El avance se hace a golpes mediante un dispositivo llamado *cruz de malta* que vemos en la figura 176. El tambor tiene un perno que

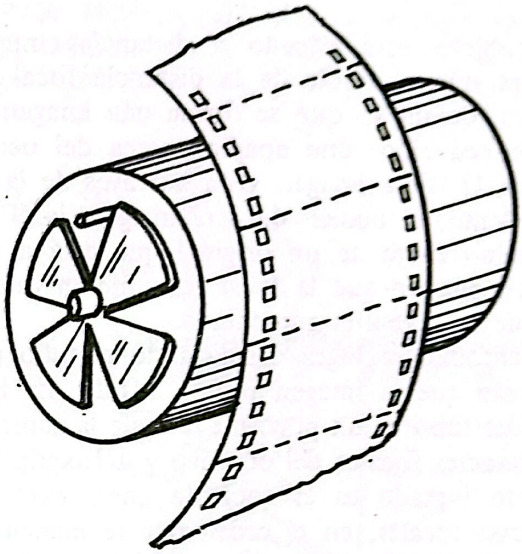


Fig. 176. – Para cinematografía se proyectan sucesivas escenas.

corre dentro de las ranuras de la cruz y al girar ésta se produce la rotación a saltos del tambor y el avance del mismo modo de la película.

Las imágenes se proyectan sobre una pantalla blanca, mediante un aparato similar al de la figura 175, ya que la diferencia es que en lugar de placas fijas se tiene un rollo de película negativa. Claro, se requiere precisión en los saltos de avance, alto poder lumínico del foco y buena calidad de las lentes usadas. La exposición al ojo de cada foto se hace durante 1/24 segundo.

El telescopio

Para ver objetos distantes hay que formar una imagen agrandada cerca del observador y ello se logra mediante el *anteojo astronómico* o *teles-*

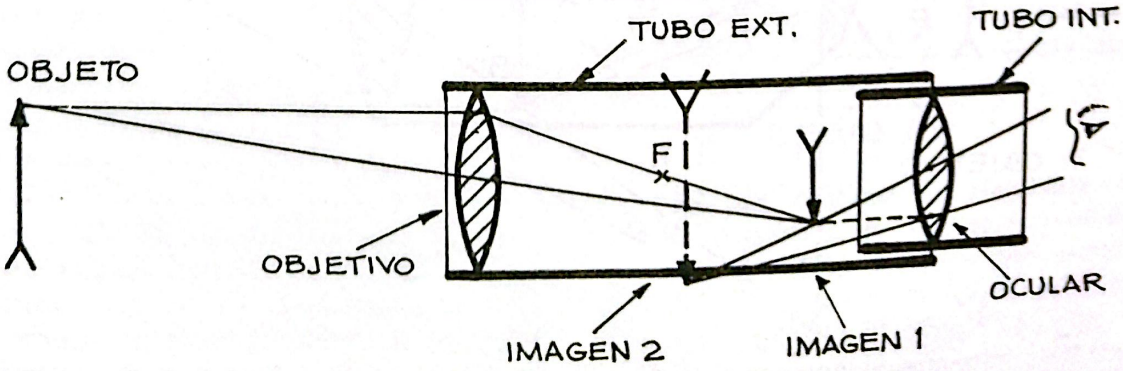


Fig. 177. – Disposición esquemática del anteojo astronómico.

copio que muestra la figura 177 en corte esquemático. Tiene dos lentes, el objetivo y el ocular, fijados a dos tubos, uno de los cuales puede deslizarse dentro del otro para variar la distancia entre las lentes; ese desplazamiento mediante tubos concéntricos ha dado en llamarse telescópico.

El objeto está situado a distancias mucho mayores que el doble de la distancia focal del objetivo, de modo que se forma una imagen de tamaño reducido, que aparece cerca del ocular (imagen 1). Esta imagen vista a través de la segunda lente, el ocular, da otra imagen, la N° 2, que, como parte de un original que está a una distancia mayor que la focal pero menor que el doble de ésta, resulta aumentada.

El enfoque se logra desplazando el tubo menor hasta que la imagen resulta nítida. La longitud del tubo es un poco mayor que la suma de las distancias focales del objetivo y del ocular. El aumento logrado es el cociente entre esas dos distancias focales, en el orden que se mencionaron. De paso, nótese que los objetos se ven invertidos. Agregando una lente se consiguen imágenes derechas y entonces tenemos el *anteojo terrestre.*

El microscopio

Para poder apreciar objetos muy pequeños se usa este aparato, cuyo corte esquemático vemos en la figura 178. Consta de un objetivo que actúa como proyector y un ocular destinado a aumentar el tamaño de la imagen. Los rayos de luz que vienen desde la izquierda suelen concentrarse mediante un espejo parabólico. El objeto se coloca en *A* y queda iluminado por transparencia.

Siendo el objetivo una lente convergente, con el objeto colocado a una distancia comprendida entre la focal y el doble de ella, dará una imagen invertida, real y aumentada, que en la figura es la *B*. Esta imagen, vista a través del ocular colocado de modo que la distancia a la imagen sea mayor que la focal y menor que el doble de ella, produce un nuevo aumento; pero como esa distancia es menor que la distancia focal, no hay inversión de la imagen (figura 172) y la tenemos en *C* que es derecha con respecto a *B* pero conserva la inversión inicial con respecto a *A*.

El aumento del tamaño de la imagen con respecto al objeto es igual al producto de los aumentos logrados por el objetivo y el ocular y depende de los factores geométricos constructivos. Se lo expresa como un número, diciendo, por ejemplo, que un microscopio es de 100 aumentos.

Dispersión de la luz

Hasta aquí hemos visto fenómenos que ocurrían con la luz y que eran explicables mediante la teoría corpuscular de la misma, pero ahora trataremos un nuevo comportamiento que requiere una interpretación por la teoría ondulatoria; ya dijimos que finalmente se adoptó la hipótesis de los corpúsculos con una onda asociada, o corpúsculos vibrantes.

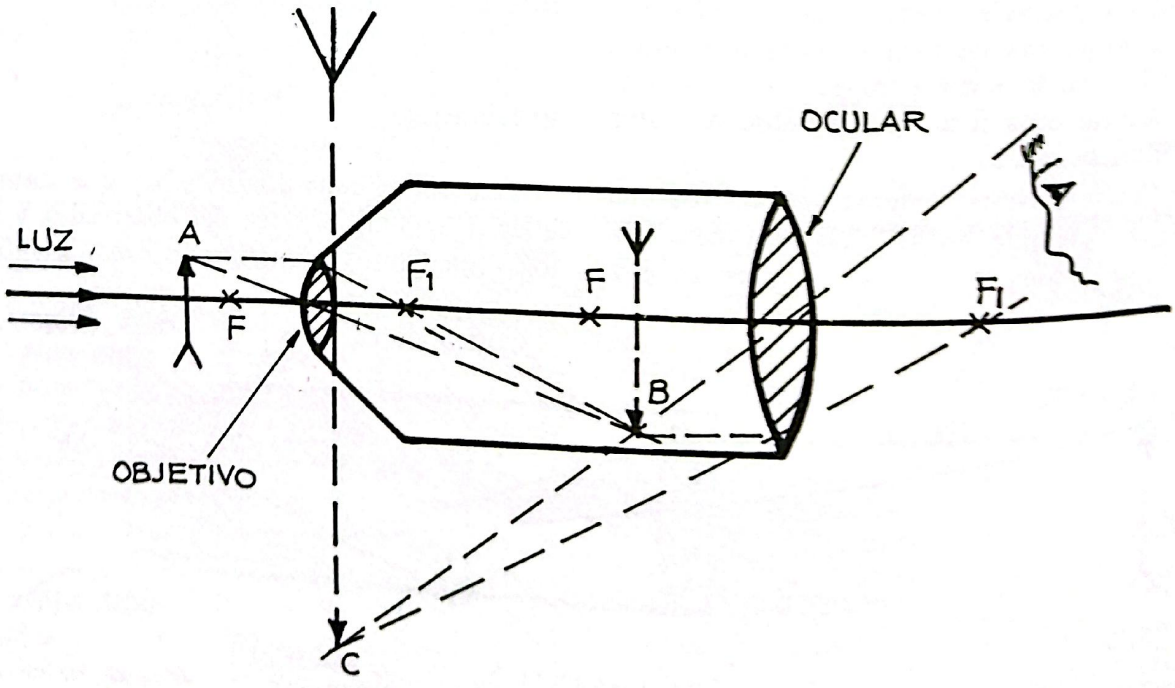


Fig. 178. – Corte esquemático de un microscopio.

Si se coloca un prisma de cirstal, con sección triangular, tal como lo muestra la figura 179, y le enviamos un rayo plano de luz blanca, que adopta la forma de una lámina delgada por la acción de una ranura que hay en una pantalla, se observará que en otra pantalla colocada a la salida de la luz se forma una serie de franjas paralelas de diferentes colores, comenzando por el rojo arriba y terminando con el violeta abajo.

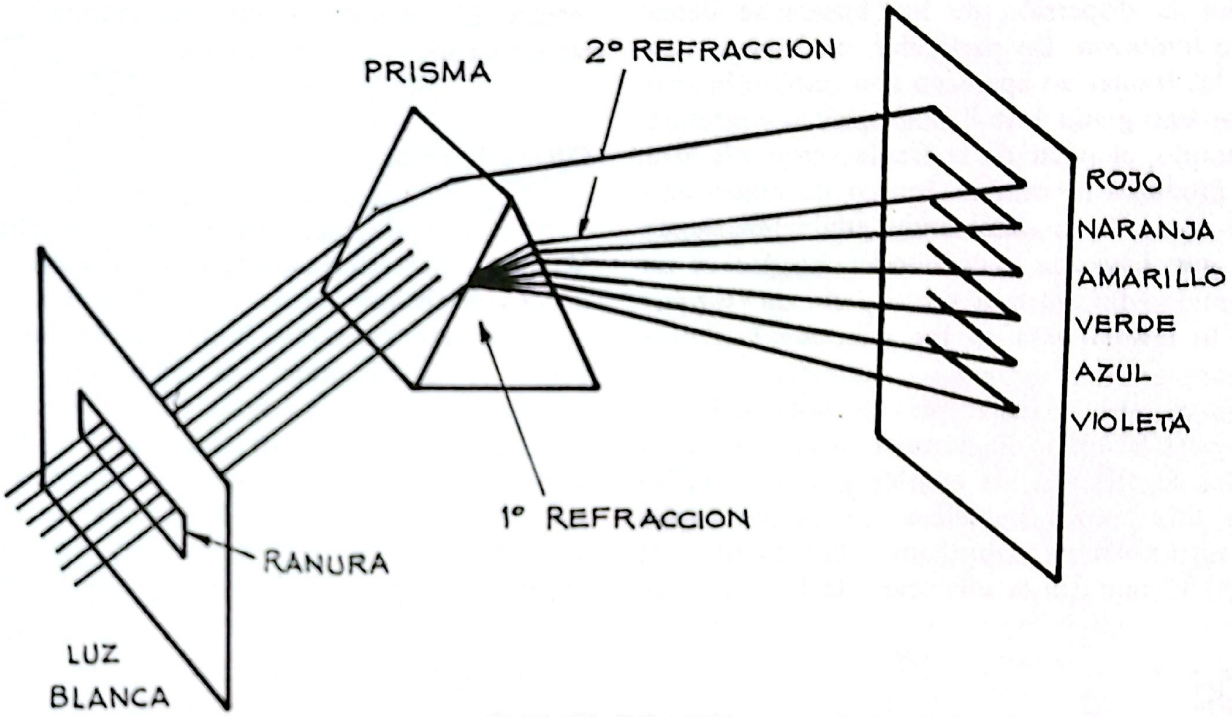


Fig. 179. – Montaje de un prisma para producir la dispersión de la luz blanca.

Esto se explica porque la refracción en el cristal se cumple con diferente índole de refracción según el color de la luz, correspondiendo a la luz violeta el mayor índice. La luz blanca es en realidad la suma o composición de luces de todos los colores y la franja que aparece en la pantalla se llama *espectro luminoso*. El fenómeno de separar la luz en sus componenetes se llama *dispersión*.

Frente a ese hecho la teoría ondulatoria de la luz explica que cada color corresponde a una vibración de una determinada frecuencia o, lo que es lo mismo, a una determinada longitud de onda. Como la frecuencia de estas vibraciones es muy alta, muchos millones de ciclos por segundo, la longitud de onda es muy pequeña, y debería medirse en millonésimos de milímetro, pero se adoptó una unidad llamada Angstrom (A°) que es la décima parte de un millonésimo de milímetro. Conviene recordar que siendo la velocidad de propagación de la luz unos 300 millones de metros por segundo, la longitud de onda resulta el producto de esa velocidad por el tiempo que dura un período o dividida por la frecuencia de la vibración.

Por ejemplo, una luz de 6.000 A° que es de color *verde*, ¿qué frecuencia tiene su vibración? Sabemos que la frecuencia se determina por el cociente entre la velocidad de propagación y la longitud de onda, pero debemos tomar ambas magnitudes en la misma unidad, por ejemplo el metro. Entonces, debemos expresar la longitud de onda del color verde en metros:

$$6.000\ A^\circ = \frac{6.000}{10.000.000.000}\ m$$

puesto que el A° es la décima parte de un millonésimo de milímetro; ahora dividimos la velocidad de la luz, en metros por segundo, por esa longitud de onda en metros y nos da:

$$f = \frac{300.000.000}{\frac{6.000}{10.000.000.000}} = 500\ MMHz$$

es decir 500 millones de Megahertz, aclarando que el *Megahertz* es una unidad de frecuencia que vale un millón de ciclos por segundo. Como se ve, en el campo de la luz, las cifras son astronómicas, y valga la metáfora.

La composición espectral de la luz, o sea la combinación de luces de diferentes colores para

formar luz blanca se comprueba dibujando sobre un disco sectores coloreados con los colores enumerados en la franja de la figura 179. Haciendo girar al disco rápidamente, se lo ve de color blanco.

El espectro luminoso

Hemos dicho que la franja multicolor obtenida por la dispersión de luz blanca se llama espectro luminoso. En particular, ese espectro en el cual las franjas no aparecen con cambio brusco de color sino gradual, se llama espectro continuo. Por ejemplo, al pasar de la franja verde a la azul no se produce un cambio brusco de color sino que el tono se va cambiando gradualmente de modo que hay una zona donde el color es un tono intermedio entre el verde y el azul (turquesa) y lo mismo pasa en las zonas de los otros colores.

Pero el espectro solar presenta una particularidad, y es la aparición de rayas negras en determinados lugares. La luz emitida por la incandescencia de vapores metálicos, en cambio, tiene unas rayas blancas o brillantes. Por ejemplo, la figura 180 muestra la ubicación de las rayas brillantes de los espectros luminosos del hidrógeno y del sodio, luz lograda llevándolos a la incandescencia. En ambos espectros se han puesto las cifras límites de las longitudes de onda en A° para la luz visible, de acuerdo con la capacidad de ojo humano. A longitudes de onda mayores que la del rojo, o sea a frecuencias menores, se las llama *infrarrojo* y a longitudes de onda menores o frecuencias mayores que las del violeta, se las llama *ultravioleta*, y ambos son invisibles. Los rayos infrarrojos son ondas de calor y es sabido que la luz infrarroja se usa para calefacción.

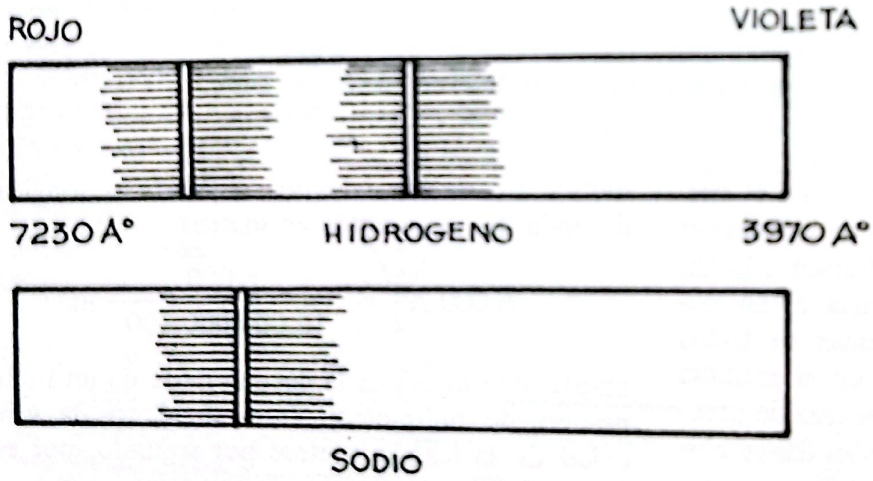


Fig. 180. — Barras brillantes en el espectro luminoso de vapores metálicos.

Las rayas brillantes que aparecen en los espectros luminosos de los vapores metálicos en incandescencia identifican al metal, pues los lugares en que aparecen y la cantidad son propias de cada uno. Esta circunstancia ha permitido estudiar la composición de los astros del universo mediante el análisis de la luz que nos llega de ellos. Asimismo, en algunas ocasiones el análisis del espectro condujo al descubrimiento de un nuevo elemento o cuerpo desconocido hasta ese momento. El análisis espectral se realiza con aparatos llamados *espectroscopios*.

Filtros de color

Si mezclando luces de colores se produce luz blanca, y mezclando luces de dos o más tonalidades obtenemos otros colores de luz, resulta evidente que las ondas luminosas se comportan como todas las ondas, es decir que podemos sumar varias senoides (figura 150) y obtendremos otra senoide de diferente frecuencia; en luz, ello significa otro color. Asimismo, podemos restar sus frecuencias en vez de sumarlas y también cambiará el color. Dicho en otros términos, los colores pueden obtenerse por adición o por sustracción. Cuando queremos obtener un solo color de una luz compuesta por varios, se procede por el método de *absorción* o *filtrado*. Para ilustrar sobre esto veamos la figura 181.

Supongamos que tenemos luz blanca, o sea multicolor. Colocamos en el camino del haz un vidrio amarillo que sólo deja pasar la mitad superior del espectro; luego colocamos un vidrio azul, que sólo deja pasar la mitad inferior, que en realidad había quedado incompleta. El resultado es que emergerá únicamente el rayo de luz verde. El mismo resultado se hubiera obtenido colo-

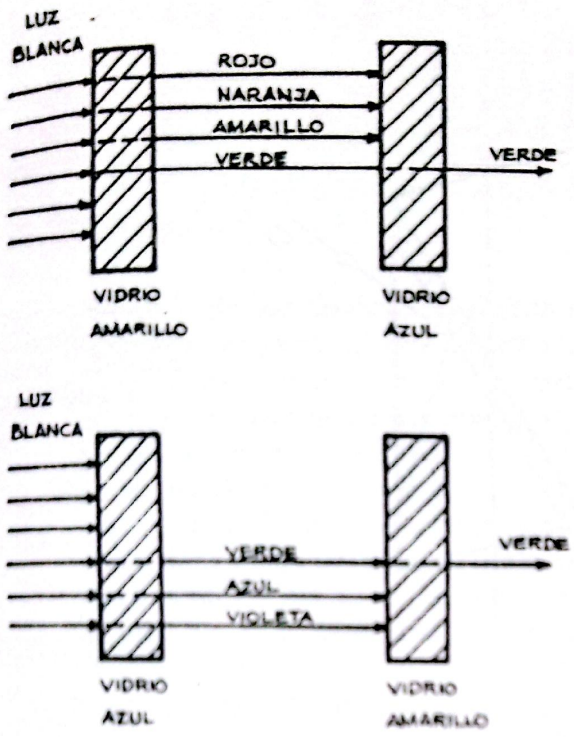


Fig. 181. – Forma de producir el filtrado selectivo de la luz.

cando primero el vidrio azul y luego el amarillo, como se muestra en la parte inferior de la figura. Cada *filtro* tiene un determinado color y absorbe una zona del espectro; combinando filtros selectivos puede obtenerse luz de un solo color o *monocromática*. Esto tiene importantes aplicaciones en fotografía.

Difracción de la luz

Si observamos un punto luminoso lejano a través de un cristal empañado el punto luminoso aparece rodeado de una aureola. Si la observación de ese foco se hace a través de una placa con un agujero muy pequeño, inclusive la aureola presenta coloraciones concéntricas. Es decir que la luz, al pasar por pequeñas ranuras o al rasar con aristas vivas, produce un fenómeno que se llama *difracción*. Por ejemplo, la sombra de una aguja no es una raya negra sino una serie de rayas paralelas de oscuridad variable.

La explicación de este fenómeno es similar a la aparición de batidos en acústica (figura 150). Dos vibraciones de frecuencias muy próximas entre si producen una interferencia de corta duración, o sea un grupo de trenes de ondas. En la luz, la interferencia se produce entre rayos luminosos de frecuencias próximas y ocurre como una dispersión parcial que tuerce la trayectoria de algunos rayos, produciendo imágenes distintas al objeto real.

Un caso típico de difracción es el que ocurre cuando iluminamos una esfera mediante un rayo de luz (figura 182). Se observa que las zonas que quedan más a la derecha de los rayos rasantes quedan oscuras, pero en la zona opuesta a la incidencia de los rayos luminosos se produce claridad. Esto no tendría sentido si no hubiera esa especie de refracción rasante que hemos definido como difracción.

Polarización de la luz

Cuando un rayo de luz atraviesa una lámina transparente de ciertos cristales, las vibraciones de los rayos componentes se realizan preferentemente en un plano. Para comprender este hecho la figura 183 nos da un símil mecánico. Se trata de suponer dos cajones con tabiques verticales, y hacer vibrar una cuerda en sentido vertical, ilustración superior. La vibración se cumple en un plano vertical y nada la impide. Pero si acostamos el cajón trasero, los tabiques quedarán en sentido horizontal y no permitirán la vibración vertical de la cuerda; tal lo que muestra la ilustración inferior. La vibración se cumple hasta el cajón y atrás de éste la cuerda queda tensa.

Nicol ideó el prisma que lleva su nombre y que consiste en realidad en dos prismas de calcita adosados, con una capa de bálsamo de Canadá interpuesta, tal como lo muestra el corte esquemático de la figura 184. Cualquier rayo de luz como el *O*, llamado ordinario, sufre reflexiones internas en el prisma y no lo atraviesa, mientras que el rayo principal *P*, si bien sufre una pequeña refracción, pasa por el cristal.

Resulta entonces que la luz que atraviesa un cierto tipo de cristal forma ondulaciones en su vibración, que se cumplen preferentemente en un plano el cual depende de la constitución íntima del cristal. La luz emergente que sólo tiene vibra-

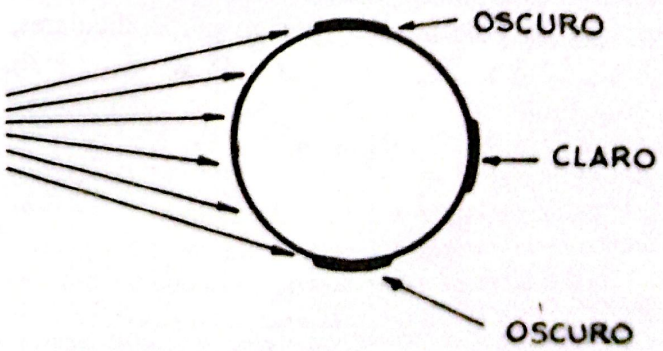


Fig. 182. – Un ejemplo de la difracción de la luz.

ciones según un plano determinado, se llama *polarizada*. Si colocamos dos láminas adosadas, una de polarización vertical y otra de polarización horizontal, la luz no atravesará el par de láminas. Un conjunto que impide el paso de rayos de luz polarizada se llama *refringente* y si impide totalmente el paso por doble polarización, es *birrefringente*. El cuarzo, la calcita (espato de Islandia), etc. son ejemplos de materiales refringentes. Mediante procedimientos especiales se puede lograr la refringencia en cristales comunes y se fabrican así anteojos polarizados para evitar el encandilamiento de la luz directa. Usualmente, se fabrican cristales refringentes de espesores muy

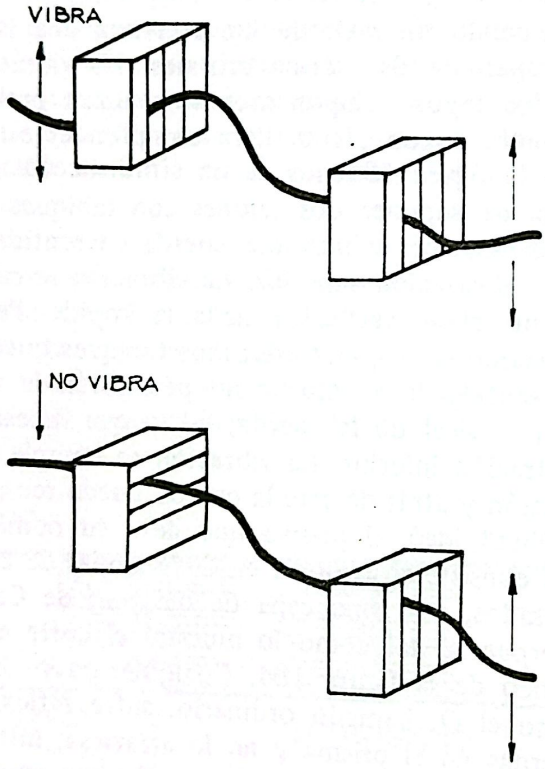


Fig. 183. – Símil mecánico de la polarización de la luz.

reducidos, 0,01 mm, y se colocan entre dos capas de cristal común, para obtener los conocidos cristales polarizados (Polaroid, etc.).

Resulta interesante destacar que si se superponen dos cristales polarizados de manera que sus ejes de polarización queden perpendiculares,

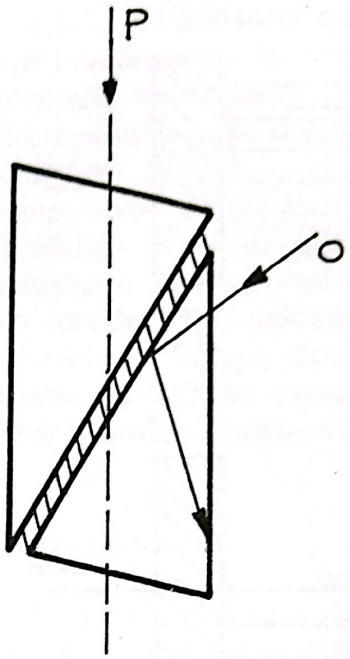


Fig. 184. – El prisma de Nicol para producir polarización de la luz.

la luz no pasa a través del par. La figura 185 explica esto, pues *V* es un cristal en el cual la polarización sólo permite la formación de vibraciones verticales y *H* es otro cristal colocado de manera que sólo permite las horizontales; del primer cristal salen rayos con polarización vertical que no pueden atravezar el segundo y por ende, pese a que incide luz desde la izquierda, no sale luz hacia la derecha. El fenómeno ocurre igual si arrimamos los cristales hasta superponerlos.

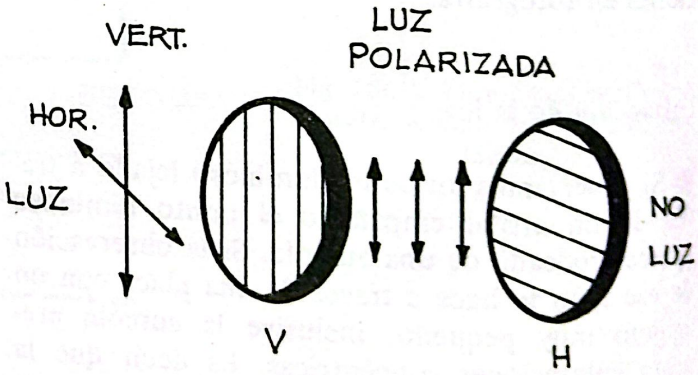


Fig. 185. – Dos cristales polarizados colocados de tal modo que sus polarizaciones sean perpendiculares impiden el paso de la luz.

Día 14

Otro de los fenómenos físicos que el hombre observó sin poder explicarlo es el fenómeno magnético, que se estudia dentro del capítulo de la Física que se llama Magnetismo. Recién cuando se descubrió la constitución íntima de la materia pudo establecerse una teoría coherente sobre su naturaleza; pero mientras, se aprovechaban sus propiedades y se explicaba superficialmente su origen. En realidad el magnetismo en su estado natural se utiliza en mucho menor grado que el que puede producirse con ayuda de la electricidad, por cuya razón en este capítulo trataremos la primer parte del tema para dejar la segunda para el próximo. Recomendamos prestar atención a la formación del campo magnético, porque las leyes que lo gobiernan tienen aplicación en el estudio de la Electricidad, tema de la próxima jornada. Iniciemos, pues, el estudio del Magnetismo que es nuestro presente objetivo.

ESTUDIO DE LOS IMANES–MAGNETISMO

Desde muy antiguo el hombre sabía que cierto mineral que se encontraba en la naturaleza tenía una propiedad especial que se manifestaba por una atracción sobre el hierro. Se trataba del óxido salino de hierro u óxido férrico al que posteriormente se denominó *magnetita*. Así, este material es un *imán natural* y acercándolo a trozos pequeños de hierro los atrae con fuerza. Rápidamente se comprobó que si se frotaba una barra de hierro con la magnetita, la misma adquiría las propiedades *magnéticas*. Se atribuye el origen de esta última denominación al nombre de una ciudad en el Asia donde existían grandes cantidades de ese mineral y donde es probable que se descubriera el fenómeno; la ciudad se llamaba Magnesia.

Desde que el hierro frotado se convierte en un *imán artificial* es lógico que a partir de ahora tomemos el nombre genérico de *imán* para aplicarlo a un trozo o barra de hierro a la cual se le comunicaron las propiedades magnéticas. Posteriormente se comprobó que el níquel y el cobalto presentaban también propiedades magnéticas y que ciertas aleaciones como la que se forma con aluminio, níquel y cobalto agregadas al hierro mejoran notablemente la propiedad magnética, especialmente la que se refiere a la retención de la imanación.

Polos del imán

Desde que la propiedad magnética se manifiesta en la atracción sobre el hierro, la primera experiencia es tomar una barra imanada de ese metal y colocarle encima un papel, sobre el que se coloca una capa de limaduras de hierro. Si el

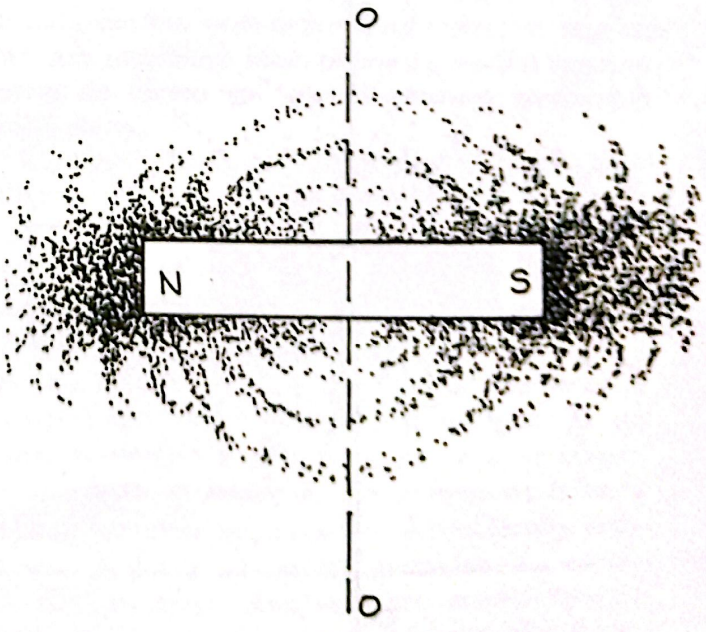
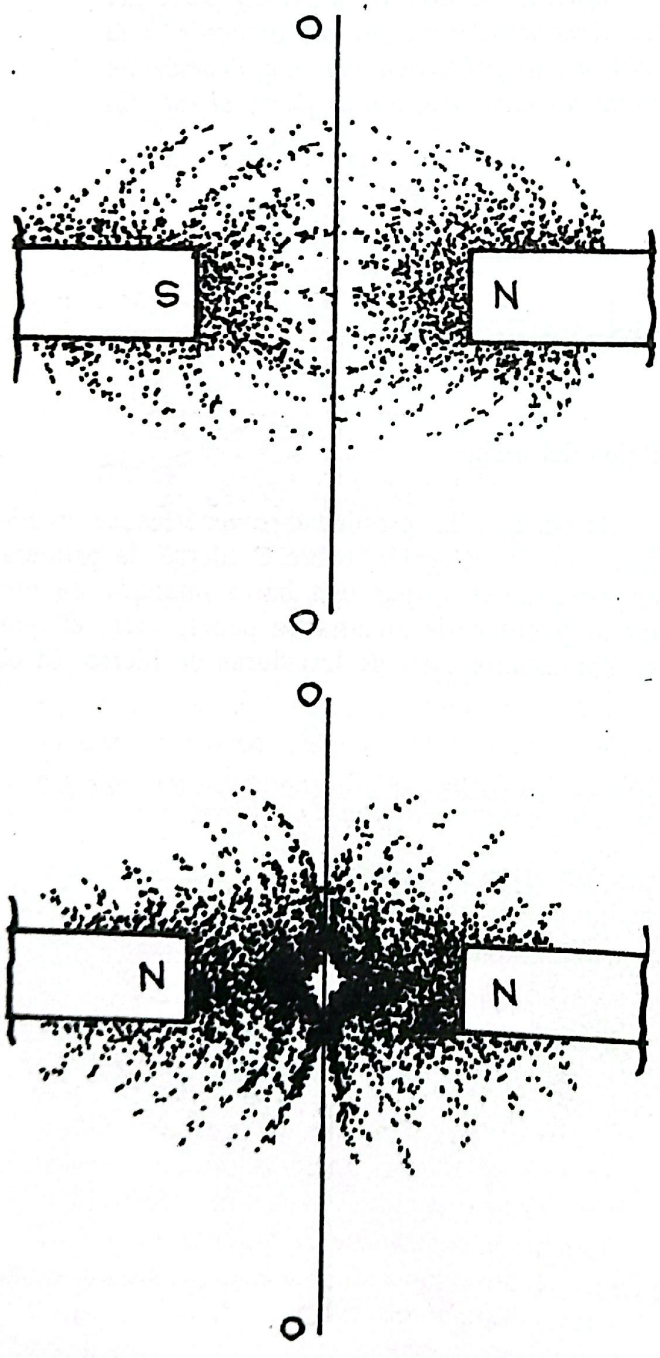


Fig. 186. – Espectro magnético formado por limaduras de hierro sometidas a un imán.

papel es transparente, veremos la barra y sobre el papel las limaduras se distribuyen en la forma como lo muestra la figura 186; a esta configuración se la denomina *espectro magnético.* Las limaduras se ubican preferentemente en los extremos de la barra, a los que se llama *polos*. y algunas se alinean formando trayectorias que van de un polo hacia el otro. Hay una línea o zona *OO* que se llama *neutra* y donde la densidad de limaduras se reduce notablemente. Las porciones de la barra que acusan una gran concentración de limaduras ocupan 1/12 de la longitud de la misma.

La segunda experiencia consiste en tomar dos barras de hierro imanado y acercarlas, colocando



g. 187. – Espectro magnético formado por limaduras sometidas a dos imanes.

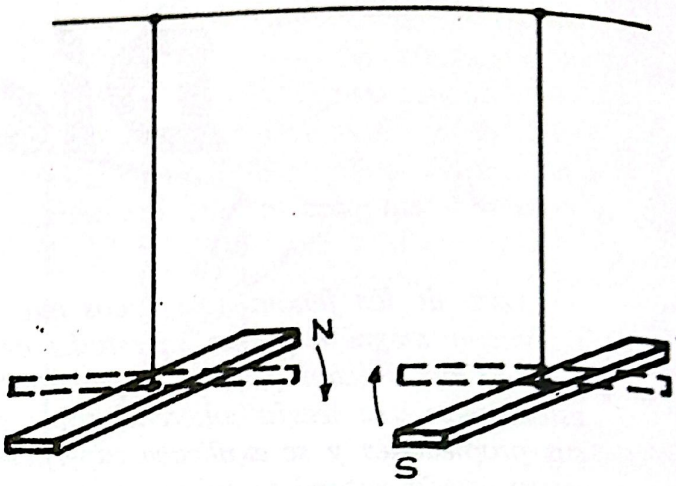


Fig. 188. - Polos del mismo signo se rechazan y de signo opuesto se atraen.

encima de ellas el papel y las limaduras. El espectro magnético puede presentar dos aspectos diferentes que vemos en la figura 187. Según acerquemos dos extremos determinados se formará un rechazo o repulsión entre las limaduras en una zona o línea *OO* (figura superior) y dando vuelta a una de las barras esa repulsión se transforma en atracción, como se ve en la figura inferior. Esto llevó a admitir que los polos de un imán son diferentes y se los llamó *norte* y *sur*, por razones que veremos al tratar el magnetismo terrestre.

Pero la primera conclusión tuvo de inmediato una segunda: polos iguales se rechazan y polos distintos se atraen. Si colgamos dos barras imanadas mediante hilos (figura 188), de inmediato las barras se orientan de tal manera que queden enfrentados los polos distintos e inclusive se acercan hasta tocarse, costando un esfuerzo el separarlas.

Magnetismo terrestre

Si suspendemos una sola barra imanada como las de la figura 188 notaremos que cualquiera que sea el lugar de la tierra donde nos encontremos, uno de sus extremos se orientará hacia el polo norte de la Tierra y el otro, consecuentemente, hacia el polo sur. Esto permitió deducir que el globo terráqueo es un enorme imán y entonces, al polo de los imanes que señalaba el norte de la Tierra se lo llamó *norte* y al que apunta hacia el *sud* se le dio este nombre. Si se analiza esta denominación según lo observado en la figura 188, nos daremos cuenta que se cometió un error, puesto que estamos admitiendo la atracción de polos del mismo nombre, pero la ciencia está llena de errores que quedaron fijos porque

era más complicado cambiar las denominaciones cuando había en el mundo millones de libros con tales irregularidades.

Quedamos entonces que el polo norte de un imán es el que apunta hacia el norte de la Tierra cuando se lo suspende de un hilo. El otro extremo o polo será entonces el sur. Las letras puestas en la figura 187 y luego en la 188 están de acuerdo con esta denominación.

Pero si en vez de colgar una barra imanada la hacemos pequeña y la apoyamos en un eje, formaremos una aguja como la que tenemos en la figura 189 y eso es una *brújula*. Claro, en cualquier lugar del globo en que nos encontremos la punta norte de ese imancillo, que está pintado de azul señalará el norte de la Tierra; entonces, giramos la cajita en que está colocada y hacemos coincidir la *N* de la escala que tiene dibujada y de inmediato tenemos la dirección de los puntos cardinales. El uso de la brújula para orientarse en la navegación fue un importante adelanto científico.

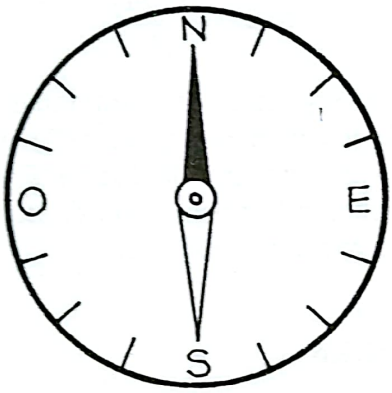


Fig. 189. – Aspecto básico de la brújula o aguja imanada.

La brújula nos permite identificar los polos de un imán, pues si la acercamos a uno de los extremos de la barra, la punta norte será rechazada por el polo norte del imán. El otro extremo será el sur. Recordemos que la punta norte se reconoce por estar pintada de azul; pero en las brújulas marinas esa punta está pintada de rojo.

La imanación

La operación por la cual se comunica la propiedad magnética a una barra de hierro se llama imanación, imantación o magnetización. Durante mucho tiempo se estudió el fenómeno para interpretarlo. Primero se pensó en un flúido que tenía la piedra imán y que pasaba al hierro pero el descubrimiento de la constitución molecular de la materia permitió arribar a una explicación mas razonable. Hay varias experiencias que ayudaron a esa interpretación.

Primero, si se corta una barra imanada en dos trozos, ambos formarán nuevas barras imanadas. Si seguimos cortando los trozos tendremos siempre imanes mas chicos y así indefinidamente. Segundo, si se llena un tubo con limaduras de hierro y se frota con un imán, se imanarán todas las limaduras y tendremos una barra imán; pero si sacudimos el tubo para desordenar las posiciones de las limaduras, la imanación desaparecerá. Esta segunda experiencia hacía desaparecer toda hipótesis sobre fluidos y dio pie a la teoría de la orientación molecular del hierro u otros metales magnetizables.

Se supone a la barra de hierro como formada por numerosos imancillos elementales (figura 190) con orientaciones caprichosas; al imanar la barra, esos imancillos se orientan todos en una dirección única que coincide con la línea que va de extremo a extremo. Claro, los imancillos no son otra cosa que las moléculas del hierro que por la acción magnetizante cambian de orientación en la masa de hierro para adoptar la posición antes explicada.

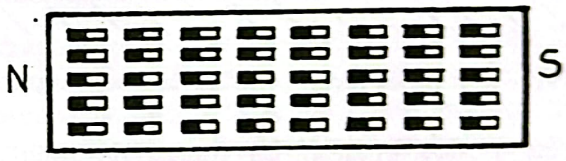


Fig. 190. – La orientación molecular en el hierro produce la imanación.

Luego, al no haber flúido magnético, sino que se trata de una orientación molecular, se explica que con una barra imán podamos imanar muchas barras de hierro sin que la primera pierda sus propiedades.

Las barras imanadas pueden ser rectas o curvadas en forma de herradura; la segunda es la que usan las costureras para levantar las agujas o alfileres que se caen. Es común colocar en el extremo de la herradura una barrita de hierro que une los dos polos, para conservar la magnetización, pues la permanencia o *remanencia* de la misma puede disminuir o aun perderse. Si un imán se somete a altas temperaturas, se origina un movimiento molecular en la masa de la barra y la orientación magnética de las moléculas desaparece; la barra pierde su imanación. La acción de efectos magnéticos externos también puede hacer desaparecer la imanación si esos efectos son de sentido contrario, es decir si la polaridad magnética es tal que enfrenta polos iguales. Esto,

como procedimiento, se emplea para desimanar barras de hierro.

Masa magnética

En cuanto se habla de un agente físico surge de inmediato la necesidad de medirlo, de apreciar cantidades del mismo. En magnetismo, queremos determinar la cantidad del mismo que tiene un imán. Como la manifestación del fenómeno son fuerzas de atracción o de repulsión, para medirlo tenemos que medir esas fuerzas. Entonces, montemos la instalación de la figura 191, con una

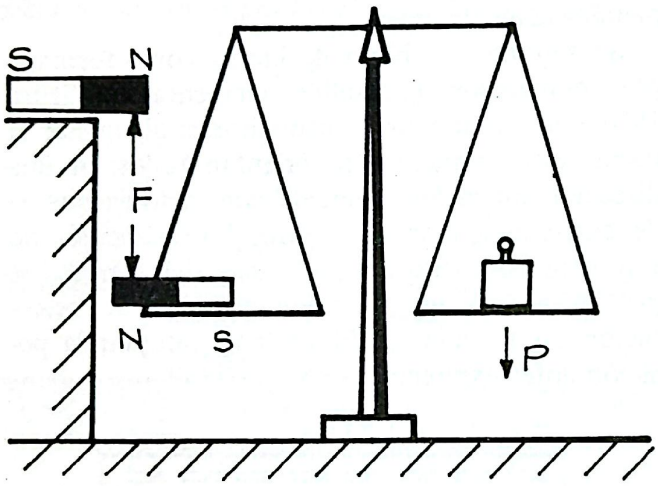


Fig. 191. – Forma de medir y definir la masa magnética.

balanza y dos imanes. La fuerza de repulsión entre los polos de igual nombre puede compensarse con pesas colocadas en el otro platillo, o sea que el peso P es igual a la fuerza de repulsión entre imanes.

Estableciendo unidades, diremos que en Física suelen usarse como unidad de fuerza la *dina* que vale 1/981 gramo y como unidad de longitud el cm. Así se define la unidad de cantidad de magnetismo o, mejor expresado, la unidad de *masa magnética,* como la que tienen dos imanes que ejercen entre si la fuerza de una dina, si están colocados a un centímetro de distancia. Para hacer una apreciación comparativa, si la balanza de la figura 191 nos marca que a un cm los imanes se repelen con una fuerza de 1 gramo, las masas magnéticas de los mismos son de 981 unidades de masa, porque el gramo equivale a 981 dinas.

Ley de Coulomb

Las fuerzas de atracción o de repulsión entre masas magnéticas decrecen rápidamente al alejarse entre si y Coulomb postuló que lo hacían

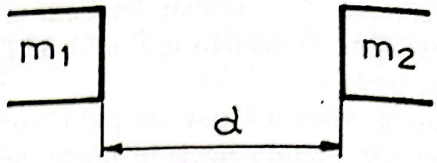


Fig. 192. – Representación esquemática de la ley de Coulomb.

siguiendo una ley cuadrática con respecto a la distancia; asimismo, la fuerza depende directamente de la cantidad de imanación o de masa magnética de cada imán. Así puede establecerse la ley de Coulomb mediante la expresión

$$F = \frac{m_1 \, m_2}{d^2}$$

donde m_1 y m_2 son las cantidades de masa magnética de los imanes (figura 192) y d la distancia entre ellos en cm; la fuerza F resulta en dinas; si se aplica a la fórmula un divisor 981, esa fuerza resulta expresada en gramos.

Campo magnético

El espectro magnético de las figuras 186 y 187 nos dice que en torno a los imanes hay una zona donde se manifiestan los fenómenos magnéticos. En efecto, el papel con las limaduras lo colocamos encima de los imanes, pero si lo subimos o lo bajamos, veremos el mismo espectro magnético. Luego, esa zona de influencia de los generadores de magnetismo, toma el nombre de *campo magnético.* No se piense que se trata de una cosa chata como el campo en el sentido geográfico; *campo* en Física es una zona de tres dimensiones donde se manifiesta un fenómeno. Así, campo gravitacional es todo el espacio que rodea a la Tierra, donde se pone de manifiesto la atracción de la gravedad.

Si colocamos dentro del campo magnético una pequeña masa magnética m (figura 193), según la

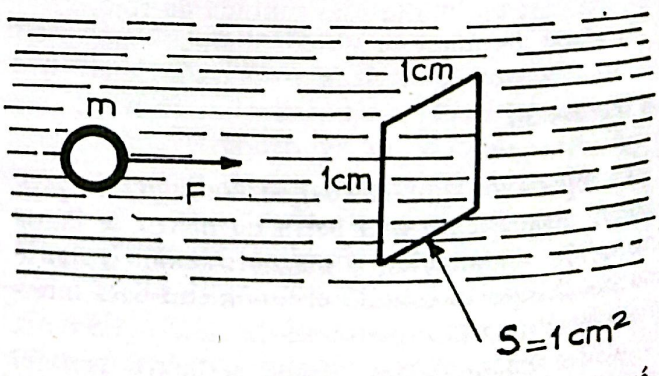


Fig. 193. – Definición de la intensidad de campo magnético por Faraday.

polaridad de la misma estará sometida a fuerzas que la llevarán hacia un lado o hacia otro; es decir que sobre esa masa actúa una fuerza F. Por definición, el campo magnético tiene una *intensidad* que se determina por el cociente:

$$H = \frac{F}{m}$$

diciendo que la intensidad del campo magnético en un punto es la fuerza que actúa en ese punto sobre la unidad de masa magnética; claro, si $m = 1$, la intensidad está dada por el valor de F. La intensidad de campo H se mide en *Gauss*.

Inducción magnética

Si colocamos una barra de hierro en un campo magnético se produce un efecto de absorción sobre las líneas de fuerza, como si a las mismas les resultara más fácil circular dentro del hierro. El campo toma la configuración que muestra la figura 194. Dentro del hierro las líneas de fuerza parecen más apretadas, como si se concentraran. Puede hablarse de que la densidad del campo magnético es mayor dentro del hierro que fuera de él. Precisamente se ha dado el nombre de densidad del campo a su intensidad, debido a la forma de representarlo que propuso Faraday. La

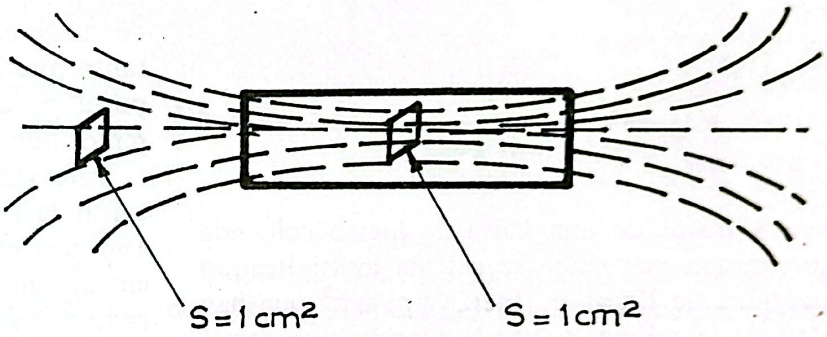


Fig. 194. – Inducción magnética en el hierro o metal paramagnético.

Pero hay otra concepción de índole práctica que permite trabajar mejor con el campo magnético en los cálculos de Física. Consiste en suponer que el campo está formado por una cantidad de *líneas de fuerza* (figura 193). Estas líneas son los vectores que representan a las fuerzas que actúan en ese campo sobre masas magnéticas que se coloquen allí. El físico Faraday propuso tomar una superficie transversal de un cm^2 y suponer que se cuentan las líneas de fuerza que lo atraviesan perpendicularmente. Así, un campo magnético que tiene una intensidad de un Gauss, es porque tiene una línea de fuerza por cm^2; un campo de 200 Gauss se identifica como teniendo 200 líneas por cm^2, etc.

Y ahora podemos extender esta consideración a una superficie S que no tenga solamente un cm^2, sino que sea de otro valor. Se llama *flujo magnético* a través de una superficie S al producto:

$$\phi = H S$$

es decir que el flujo magnético representa la cantidad total de líneas de fuerza que atraviesan esa superficie. Se lo mide en *Maxwell*. Por ejemplo, un campo de 200 Gauss ó 200 líneas por cm^2, al atravesar una superficie de 15 cm^2 dará un flujo magnético de $200 \times 15 = 3000$ Maxwell.

formación de líneas de fuerza dentro del hierro aparece por influencia o inducción del campo existente, y entonces se da el nombre de *inducción magnética* al fenómeno y se mide la misma como una cantidad de líneas de fuerza por cm^2.

Si consideramos una superficie transversal en el campo, de un cm^2, y otra igual dentro del hierro (figura 194), se establece que el cociente:

$$\mu = \frac{B}{H}$$

o sea entre la inducción magnética B y la intensidad del campo H se llama permeabilidad magnética del hierro o del metal que se coloque. Como B y H se toman en la misma unidad, μ no tiene unidad y pasa a tener el carácter de un coeficiente, pero no es una constante, como veremos.

Para el aire y para todos los cuerpos indiferentes al magnetismo, como la madera, papel, ciertos metales, etc. cuerpos insensibles o no magnéticos, la permeabilidad vale uno, pues el campo no se deforma al colocarlos, y son iguales B y H. Para los cuerpos sensibles al magnetismo, como el hierro, el cobalto, el níquel, llamados *paramagnéticos*, la permeabilidad vale más que la unidad. Y hay cuerpos que presentan una suerte de impermeabilidad al campo magnético, de

modo tal que las líneas de fuerza eluden penetrar en ellos (figura 195). Esos cuerpos se llaman *diamagnéticos,* y el bismuto y el bronce son ejemplos típicos; la permeabilidad de los cuerpos diamagnéticos es menor que uno. El flujo mag-

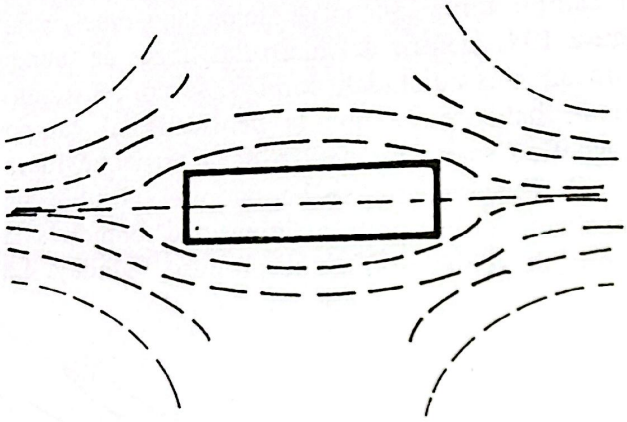


Fig. 195. – Inducción reducida en los cuerpos diamagnéticos.

nético a través de una barra de hierro colocada en un campo magnético se calcula multiplicando la cantidad de líneas de fuerza por cm^2 que hay dentro de la misma B, por la sección transversal S:

$$\phi = B\,S$$

tal como se hacía con el campo en el aire, pero teniendo en cuenta la inducción en el hierro.

Curvas de imanación

Hemos definido a la permeabilidad magnética del hierro o material paramagnético como el cociente entre la inducción y la intensidad de campo, pero dijimos que esa relación no daba una cifra constante. Lo que ocurre es que cuando el hierro está virgen, sin ninguna imanación, es muy permeable al campo magnético, pero a medida que se va imanando, esa permeabilidad disminuye, tal como si cuando se van produciendo las orientaciones moleculares cada vez quedan menos moléculas por orientar y disminuyera el ritmo de esa acción. Inclusive, llega un momento en que ya todas las orientaciones se han producido y entonces el hierro está *saturado* de magnetismo y su permeabilidad se reduce tanto que llega a ser la unidad; ese hierro se comporta ya como un cuerpo no magnético si queremos aumentarle la imanación.

Para ver este hecho con más claridad podemos trazar la curva de imanación del hierro; la figura 196 nos muestra lo que sucede si representamos en un gráfico los valores de la intensidad del campo magnético en el eje horizontal y la inducción en el hierro en el eje vertical. Aumentando la densidad del campo magnético aumenta la inducción en el hierro, pero ese aumento va siendo cada vez menor, hasta que se llega a un punto S que marca la *saturación.* La curva OS es la curva de imanación del hierro.

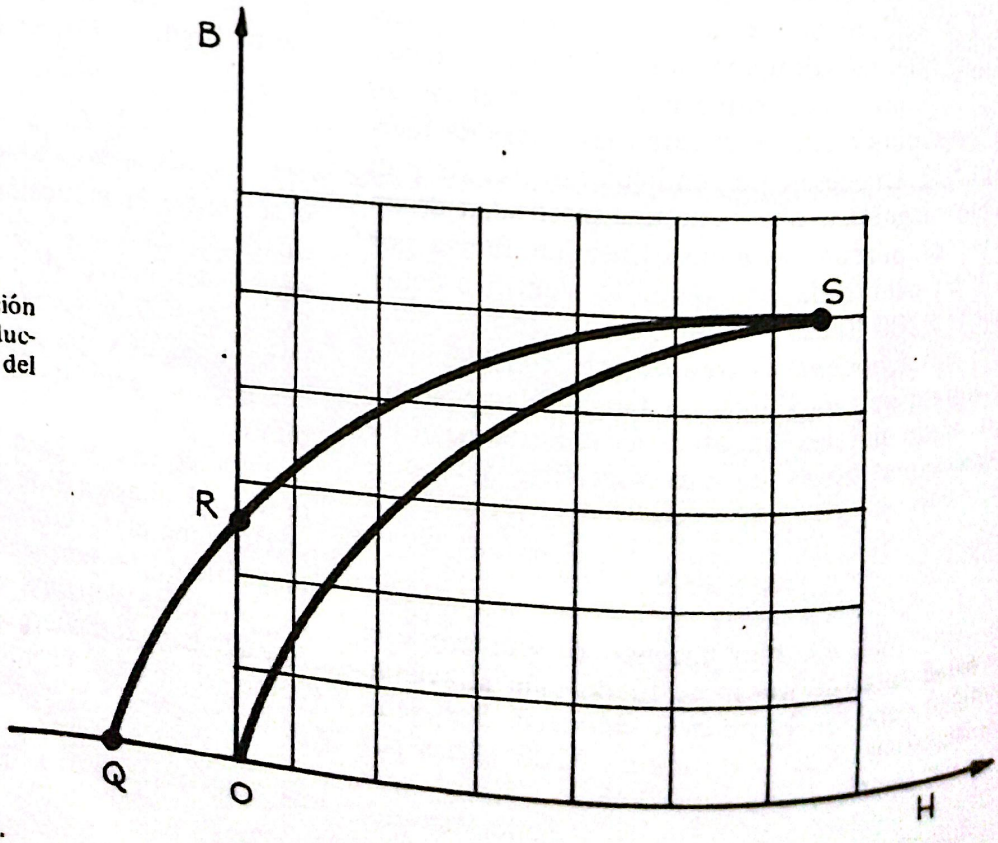


Fig. 196. – Curva de imanación que da los valores de la inducción referidos a la intensidad del campo.

Si entonces reducimos la intensidad del campo magnético, la inducción en el hierro va disminuyendo, y cuando llegamos con H al valor cero, punto R, resulta que en el hierro queda una cierta imanación medida por el segmento $O\,R$. Ese valor se llama *magnetismo remanente.* Según la composición del hierro, acero o metal paramagnético, el valor $O\,R$ difiere; es lógico que para fabricar imanes artificiales se buscará un metal que presente un valor $O\,R$ grande.

Si se quiere eliminar el magnetismo remanente, aplicamos un campo magnético de sentido contrario al anterior, por lo que los valores de su intensidad se tomarán hacia la izquierda de O; llegando a un cierto valor $O\,Q$ de la intensidad de campo, llamado *fuerza coercitiva,* se anula la inducción remanente y el hierro queda desmagnetizado.

Si continuamos la magnetización de ese hierro con el sentido nuevo del campo, llegaremos a la saturación despues de una imanación creciente; la figura 197 nos muestra lo que ocurre desde Q hasta S_1, punto simétrico del S. De allí rebajamos la intensidad del campo y llegamos a R_1, inducción remanente de sentido contrario a la $O\,R$. Cambiando el sentido del campo magnético, o sea volviendo al sentido primitivo, se logra la curva $R_1\,Q_1\,S$. Este proceso se puede cumplir repetidamente y siempre se logrará la curva cerrada que muestra la figura, curva que se llama *ciclo* o *lazo de histéresis,* porque el fenómeno en si toma el nombre de histéresis.

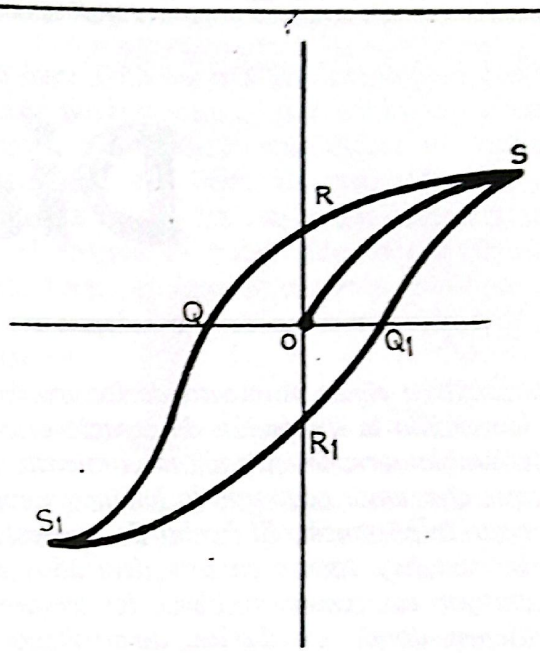


Fig. 197. - Ciclo o lazo de histéresis de los metales paramagnéticos.

Hacemos la aclaración que hemos hablado de cambiar el sentido del campo magnético y que ello no es fácil de lograr trabajando con campos producidos con imanes, ni todo el proceso de imanación se realiza con esos elementos. En la práctica la imanación, los cambios de sentido, etc. se realizan produciendo esos campos magnéticos con ayuda de la electricidad, tema del que nos ocuparemos en el capítulo próximo.

Día 15

Si en algún momento de los muchos que se dedicaron a escribir este libro hemos lamentado la limitación de espacio es cuando abordamos el último capítulo de la obra, o sea la jornada que ahora comienza. La amplitud e importancia de los temas es tal que al resumir cada uno lo hacíamos con el temor de que se pierda claridad o que se le reste importancia. El hecho de que este libro forme parte de una colección, dentro de la cual hay tomos enteros dedicados a temas parciales de la Electrónica, sirvió para mitigar esa sensación; claro, los lectores que se interesen por algunos de esos asuntos tienen donde estudiarlos, desarrollados con el mismo método con que se encaró el presente libro. Hablar de los usos que el hombre da a la Electricidad sería pueril, pues basta observar a nuestro alrededor para ver muchas de sus aplicaciones, entre las que podemos citar la iluminación, la radio, la televisión y la fuerza motriz industrial, para que quede destacado el rol vital que desempeña en la vida del hombre de nuestro tiempo. Sin otra premisa, abordemos el tema de la presente jornada.

ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD

En el mundo de hoy se habla de Electricidad como de un agente físico conocido más por la gran difusión de sus aplicaciones que por ser verdad que sea totalmente conocida. Y, tal como ocurre con el Magnetismo, su presencia no puede ser captada en forma directa, a través de nuestros sentidos, como ocurre con el calor, la luz, etc., sino mediante sus efectos. Precisamente, en la antigua Grecia, en la ciudad de Mileto, el físico Thales encontró que si frotaba una piedra llamada *elektron,* la misma atraía a partículas muy livianas; atribuyó el fenómeno a la piedra y lo llamó *electricidad.* La tal piedra era el ámbar y lo que ocurría no era propio de ella sino que se manifiesta en muchos cuerpos, en unos más y en otros menos.

Clases de electricidad

La experiencia de Thales fue repetida miles de veces, probando con distintos materiales y se encontró que algunos cuerpos al ser frotados, adquirían la propiedad señalada, mientras que otros no. Así, surgió el primer aparato demostrativo, que es el péndulo eléctrico (figura 198), que consiste en una bolita de corcho, de médula de sauco, etc, suspendida de un soporte por un hilo. Si frotamos con un paño seco una barra de *vidrio,* su extremo atraerá a la bolita al acercarlo.

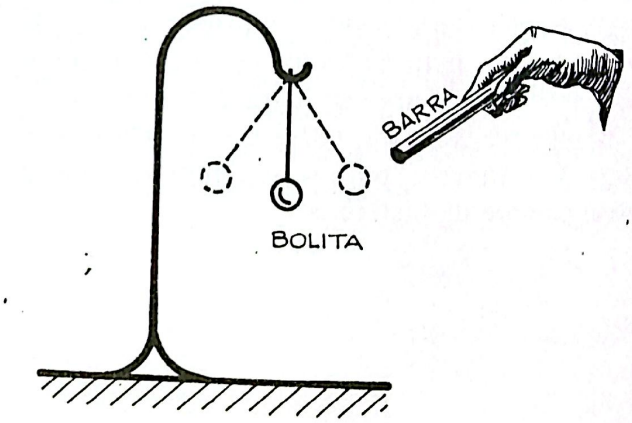


Fig. 198. – El péndulo eléctrico permite comprobar la existencia de cargas eléctricas.

En un segundo intento, la rechazará. Pero, y aquí viene lo curioso, si ahora acercamos una barra de *resina,* previamente frotada, atraerá a la bolita. Así surgió la hipótesis de la existencia de dos clases de electricidad. En ese entonces se denominó electricidad *positiva* a la del vidrio y *negativa* a la de la resina, para dejar sentado que sus comportamientos eran opuestos.

Al efecto de adquirir propiedad eléctrica mediante el paño se lo llamó electrización por *frotamiento,* pero si tocamos un cuerpo no electrizado con una barra frotada, el cuerpo adquiere electrización por *contacto.* Esto se prueba fácilmente mediante dos bolitas de corcho colgada de un cuerpo (figura 199); si tocamos ese cuerpo

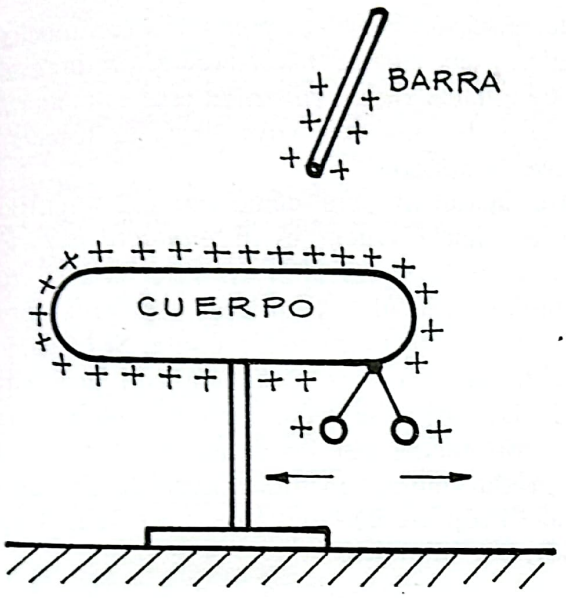


Fig. 199. – Las cargas eléctricas van hacia la superficie externa de los cuerpos.

con una barra de vidrio electrizada, la carga eléctrica pasa al mismo y a las bolitas y como ambas se cargan con el mismo signo, se repelerán. Esto demuestra la electrización por contacto, pero evidencia otra cosa muy importante: cargas eléctricas del mismo signo se *rechazan* y cargas de signo contrario se *atraen*. La segunda parte de la frase se demuestra tal como se dijo para la figura 198, cuando la bolita estaba cargada con electricidad vítrea o positiva y le acercábamos la barra de resina cargada de electricidad negativa: comprobamos que la atrae.

Electrización de los cuerpos

Ya hemos mencionado la adquisición de cargas eléctricas por frotamiento y por contacto. Pero no hace falta tocar a un cuerpo para que se electrice, pues si tomamos un cuerpo de cualquier forma, por ejemplo una esfera de vidrio, y le acercamos una barra de resina frotada con un paño de lana, o sea con cargas negativas, la esfera se electrizará sin haber sido tocada (figura 200). Este hecho es muy importante, pues permite llegar a conclusiones sobre la naturaleza de la electricidad.

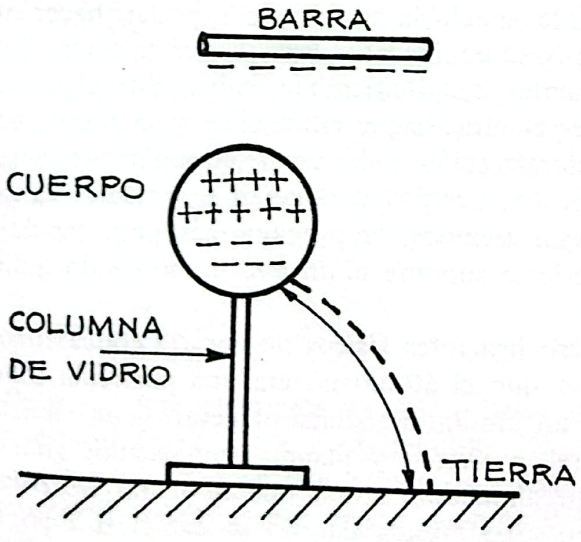


Fig. 200. – Forma como se produce la electrización por influencia.

Esa electrización a distancia se denomina: *por influencia,* y solo se explica si admitimos que en un cuerpo no electrizado hay un equilibrio entre cargas positivas y negativas. Al acercar una barra con cargas negativas, por ejemplo, las cargas positivas del cuerpo son atraídas hacia la barra y las negativas rechazadas, quedando una manifiesta separación de dos zonas en el cuerpo. Si en ese momento tocamos la parte inferior del cuerpo con la mano o con un alambre, las cargas negativas se irán a tierra o a la masa donde el cuerpo está apoyado y en el mismo solo quedarán las cargas positivas. Si alejamos la barra de resina mientras no se hayan ido las cargas negativas, se restablece el equilibrio y el cuerpo pierde su carga eléctrica, pero si eso lo hacemos después de haber facilitado la fuga de las cargas negativas, el cuerpo conservará cargas positivas.

Conducción de las cargas eléctricas

Hemos mostrado en tres figuras aparatitos para comprobar la existencia de cargas eléctricas, las dos clases de cargas y la electrización por frotamiento, por contacto y por influencia. Pero esos aparatos estaban apoyados en una mesa y sin embargo las cargas no fugaban a través de la columna de soporte; y en el caso de la figura 200, hablamos de tocar la esfera electrizada con un alambre para facilitar las fugas de las cargas negativas pese a que esa esfera está apoyada en una columna por la que podría realizarse tal fuga.

Esto nos dice que los cuerpos se comportan de diferente manera en la conducción de cargas eléctricas. El vidrio, la resina y toda una serie de cuerpos llamados malos conductores o *aisladores,* no facilitan el trasporte o el movimiento de esas cargas, por cuya razón una barra frotada las conserva en su extremo sin que corran por la barra y se escapen a través del cuerpo del operador que la sostiene. Los metales y otros cuerpos llamados *conductores* permiten el movimiento de cargas y por eso en la figura 200 tocábamos la esfera con un alambre metálico para facilitar la fuga de las

cargas negativas que no se iban por la columna de vidrio que sostiene a la esfera.

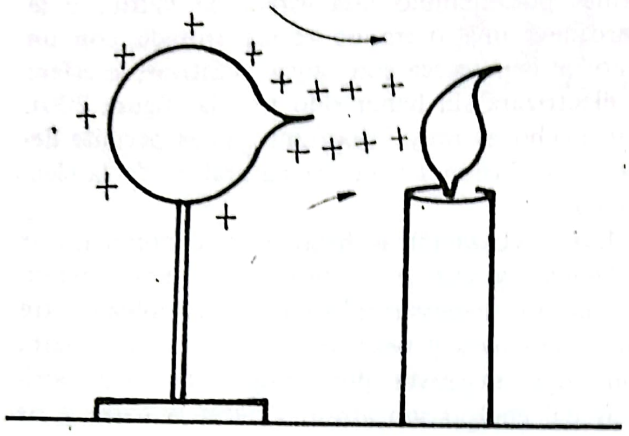


Fig. 201. El viento eléctrico son cargas que escapan por las puntas.

Claro, para que haya desplazamiento de cargas se necesita que alguna acción produzca ese desplazamiento. Cuando hay fuerzas de repulsión entre cargas del mismo signo, se provoca tal movimiento. Esto se demuestra mediante varios experimentos. Por ejemplo, si tenemos un cuerpo aislador como el de la figura 199, y lo electrizamos positivamente, esas cargas se rechazarán entre si, de tal modo que tienden a alejarse unas de otras. La posición final de las cargas será la superficie externa del cuerpo pues allí no pueden alejarse más. Luego, las cargas ocupan únicamente la superficie externa de los cuerpos.

Pero si hacemos un cuerpo con forma esférica, pero con una punta saliente como lo muestra la figura 201, las cargas serán impelidas por las fuerzas de repulsión hacia esa punta y si son muchas, el rechazo las lanzará hacia afuera, produciendo lo que se llama *viento eléctrico;* esto se comprueba acercando una vela cuya llama se torcerá e inclusive se apagará.

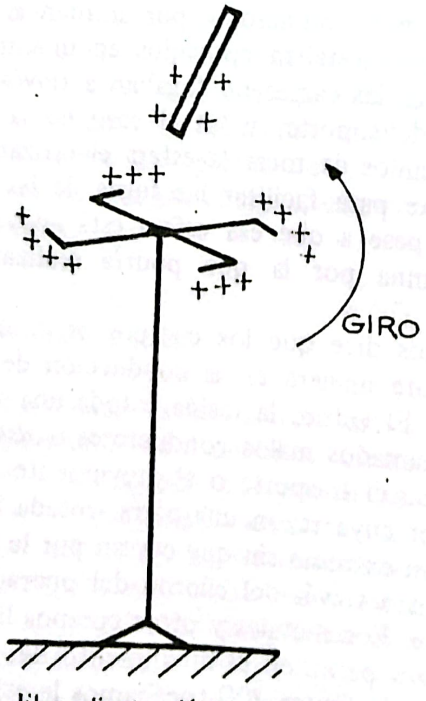


Fig. 202. El molinete eléctrico es otra demostración del escape de cargas.

Otro aparatito para demostrar esa impulsión de cargas hacia afuera es el *molinete eléctrico* ilustrado en la figura 202. Consiste en una cruz con puntas dobladas y afiladas, apoyada sobre una barra con su extremo en punta. Si cargamos de electricidad la cruz tocándola con una barra frotada las cargas se rechazarán y saldrán finalmente con fuerza por las puntas dobladas de la cruz, produciéndose un movimiento de giro de la misma. El soporte de la cruz debe ser de material aislador, por supuesto.

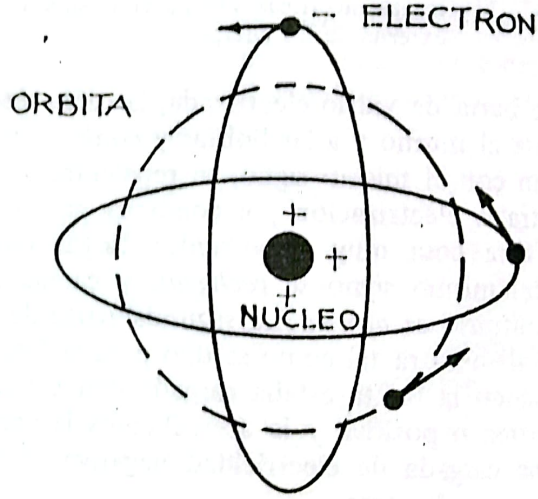


Fig. 203. El átomo no es macizo sino que forma un minúsculo sistema planetario.

Naturaleza de la electricidad

Los fenómenos eléctricos fueron comprobados durante muchísimos años sin poder hacer un análisis sobre la naturaleza de los mismos. Simplemente se admitía que había dos clases de cargas eléctricas, que entre ellas se ejercían fuerzas de atracción o de repulsión, según sus signos, y que los cuerpos conducían o no tales cargas. En esos tiempos, la porción más pequeña de la materia se suponía el *átomo,* como sólido indivisible.

Pero brillantes físicos de nuestra época encontraron que el átomo no era una partícula sólida sino un diminuto sistema planetario con un astro central o *núcleo* y planetas minúsculos girando en su alrededor, a los que se llamó *electrones* (figura 203). Cada cuerpo se caracteriza por el número de electrones girantes; así el hidrógeno tiene un solo electrón, el helio, tiene 2 y así

siguiendo llegamos al uranio que tiene 92. El núcleo no es indiviso sino que tiene una masa llamada *neutrón* con una serie de partículas llamadas *positrones*, en cantidad igual a la de electrones en órbitas. Los electrones son cargas eléctricas negativas y los positrones son cargas positivas; ambas cargas de cada partícula son iguales pero de signos contrarios.

La apariencia sólida del átomo se justifica si pensamos que si atamos una piedra a un hilo y la hacemos girar rápidamente, nuestra vista nos hará ver un aro macizo. Si tenemos varios hilos con piedras, girando en diferentes planos pero con un centro común, la apariencia será la de una esfera sólida. Bien, la mano es el núcleo y las piedras los electrones, y por eso se creyó durante mucho tiempo que el átomo era un sólido.

Así tenemos al átomo como un sistema planetario en miniatura, con una cantidad de cargas positivas incrustadas en el núcleo y una cantidad igual de cargas negativas girando independientemente en su alrededor; la cantidad de cargas caracteriza a la substancia. Si cualquier circunstancia hace aumentar la velocidad de giro de un electrón, como el calor (frotamiento), se producirá un aumento de la fuerza centrífuga (figura 42) y ese electrón será impulsado hacia afuera del átomo quedando liberado. Así se produce la electrización de la materia, pues el electrón constituye entonces una carga eléctrica negativa libre y el átomo quedó con una carga positiva no equilibrada o sea que se transforma en una carga eléctrica positiva libre.

La electrización por influencia también se justifica si pensamos que en la figura 200 las cargas negativas son electrones liberados de sus órbitas por la acción de las fuerzas eléctricas de repulsión, y las cargas positivas son átomos incompletos que han perdido un electrón o más de uno. Las fuerzas que mantienen a los electrones en sus órbitas a pesar de la acción centrífuga que tiende a lanzarlos hacia afuera, son las fuerzas de atracción de las masas, del mismo modo que la gravedad es una manifestación de la atracción que el globo terráqueo ejerce sobre los cuerpos, manteniéndolos adheridos contra su masa.

El campo eléctrico

Cada vez que definimos un agente físico hubo que establecer la manera de medirlo, de establecer una cantidad de él que fuera la unidad. La electricidad como agente físico también deberá tener su unidad, su porción unitaria que permita medir grandes porciones de la misma. La más pequeña cantidad de electricidad o de *masa eléctrica* es el electrón, pero es muy pequeña para ser usada como unidad de masa, por lo que se emplea otra masa unitaria.

La unidad física de masa eléctrica se toma como:

$$2{,}1 \times 10^{10} \text{ electrones}$$

La unidad de masa eléctrica que se usa en la técnica es el *Coulomb*, que equivale a:

$$1 \text{ Coulomb} = 6{,}29 \times 10^{18} \text{ electrones}$$

o sea 6,29 trillones de electrones; no debe asombrar esa cantidad tan grande si se piensa que si hacemos una hilera de electrones, con cinco billones de ellos alcanzamos apenas a un centímetro de longitud. A la carga o masa eléctrica se le asigna la letra Q.

La ley de Coulomb, definida para el magnetismo en la figura 192, tiene validez para los fenómenos eléctricos y se puede expresar igualmente con solo cambiar la m de masa magnética por la Q de masa eléctrica:

$$F = \frac{Q_1 \, Q_2}{d^2}$$

que nos dice que dos cargas eléctricas se atraen o se rechazan con una fuerza que depende del producto de ellas y decrece con el cuadrado de la distancia que las separa; tomando las masas en la unidad física de masas eléctricas y la distancia en cm, la fuerza resulta en *dinas* (1/981 gramo).

También podemos hacer extensivos a los fenómenos eléctricos la consideración acerca del *campo de fuerzas* que hicimos para el campo magnético. Las fuerzas que actúan sobre las masas eléctricas pueden representarse por vectores y las trayectorias de esas masas al desplazarse forman líneas que se llaman *líneas de fuerza*. Si usamos la concepción de Faraday, podemos imaginar al campo de fuerzas como un manojo de trayectorias y contar las que atraviesan un cuadrado de un cm de lado colocado perpendicularmente a las mismas. Esa cantidad mide la intensidad del campo eléctrico (figura 193). En números, la intensidad del campo eléctrico se define como la fuerza que obra sobre una carga unitaria; en efecto, si en la expresión de Coulomb ponemos $Q_2 = 1$, podemos decir que una carga Q a una distancia d producirá una intensidad de campo eléctrico H que vale:

$$H = \frac{Q}{d^2}$$

y que se puede expresar también por la cantidad de líneas de fuerza por cm^2. La intensidad del campo se mide en Gauss.

Del mismo modo podemos aplicar al campo eléctrico el concepto de *flujo* que definimos para el magnetismo, llamándolo en este caso flujo eléctrico.

Potencial eléctrico

Si suponemos una masa o carga eléctrica Q que produce un campo eléctrico como el representado en la figura 204, las líneas de fuerza son

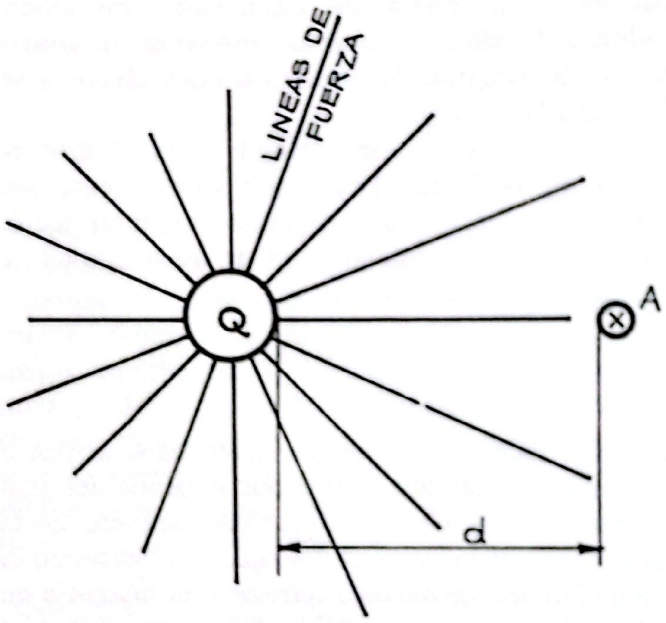


Fig. 204. – El campo eléctrico son líneas radiales que parten del cuerpo electrizado.

radiales con respecto al punto en que está colocada Q. Ahora pongamos en un punto cualquiera A del campo una pequeña partícula; sobre ella actuarán las fuerzas del campo y definiremos lo que se llama *potencial eléctrico* en el punto A como al cociente entre la carga Q y la distancia d:

$$V = \frac{Q}{d}.$$

Si la carga Q se toma en Coulomb y la distancia d en cm, el potencial se expresa en la unidad *Volt*. Es decir que una carga eléctrica de un Coulomb, a la distancia de 1 cm, produce un potencial de 1 Volt.

Ahora hagamos una consideración muy importante. Supongamos que colocamos en el punto A, figura 204, una carga eléctrica unitaria, o sea de 1 Coulomb, del mismo signo que la carga Q. Para vencer la fuerza de repulsión que obra entre ambas cargas empujamos a la carga unitaria de A hasta llegar a arrimarla a Q, ejerciendo una fuerza F a través de la distancia d, o sea desarrollando un trabajo (Capítulo 6) que vale:

$$T = F\,d$$

Pero la fuerza que actúa sobre la carga unitaria se mide por la intensidad del campo eléctrico, según la definición ya dada y como la que debemos ejercer para empujar la carga en A es igual a esa fuerza del campo, podemos poner:

$$T = \frac{Q}{d^2}\,d = \frac{Q}{d}$$

Y nos resulta que el trabajo a realizar para llevar una carga unitaria, venciendo a las fuerzas del campo, desde un punto A hasta la carga que lo produce, es igual al potencial en el punto A. Luego, el potencial eléctrico tiene el carácter de un trabajo, y mientras está latente, sin utilizárselo, es una energía potencial; de ahí el nombre de potencial con que se lo denomina.

Como el potencial depende en forma inversa de la distancia, para una carga eléctrica dada, si imaginamos una carga Q que produce un campo eléctrico según la figura 205, encontramos que a

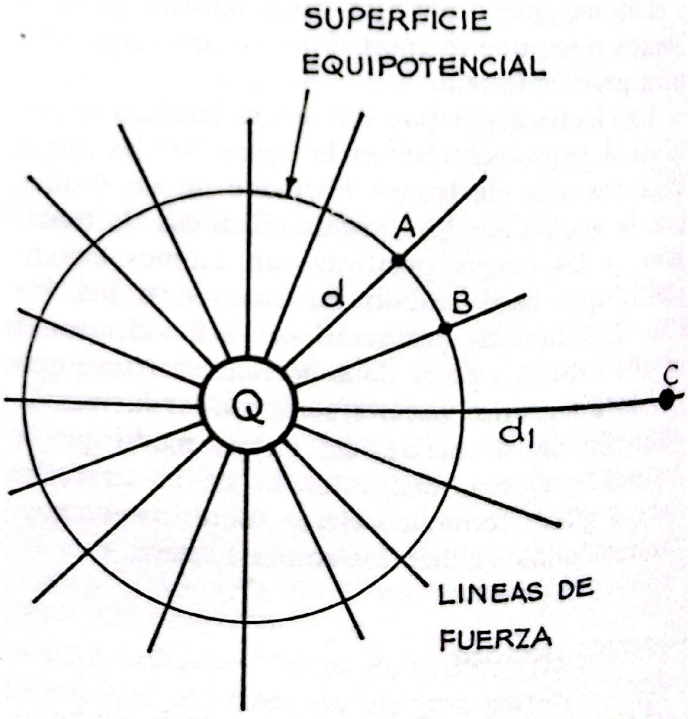


Fig. 205. – Configuración de las superficies equipotenciales.

distancias iguales de Q el potencial será el mismo. Luego, los círculos con centro en Q tienen en todos sus puntos el mismo potencial, pues el po-

tencial de los puntos A, B, etc. que equidistan de Q es idéntico. Si en vez de un círculo consideramos una esfera, ya que las fuerzas salen de Q en todas direcciones, tendremos que el potencial eléctrico en una superficie esférica con centro en Q es uniforme. Luego, la esfera es una *superficie equipotencial*; los círculos como el dibujado en la figura 205 son líneas equipotenciales.

Si tomamos un punto como el C que no pertenezca al círculo en que se halla A, el potencial de C será diferente al de A. Se define como la *diferencia de potencial* entre dos puntos de un campo eléctrico a la cifra que resulta de restar los potenciales de ambos puntos:

$$V_{AC} = \frac{Q}{d} - \frac{Q}{d_1}$$

Donde se ve que hemos colocado a V el subíndice doble para indicar los dos puntos de referencia. La diferencia de potencial entre dos puntos se llama también *tensión eléctrica* entre esos puntos, y se mide en Volt.

Capacidad eléctrica

La electrización por influencia que vimos en la figura 200 nos explica lo que ocurría en la botella que improvisó Leyden y que mostramos en la figura 206. Forrando interior y exteriormente una botella de vidrio con papel de estaño, y colocando una barra metálica en el interior, que hace contacto con la lámina interior mediante una cadenita, se puede originar el siguiente fenómeno: si tocamos la barra con una carga eléctrica, por ejemplo positiva, esa carga se propagará a la lámina interna de estaño. Por influencia, se producirá una atracción sobre las cargas negativas de la lámina externa y si facilitamos la fuga de las cargas positivas de esa lámina y después desconectamos o alejamos la carga exterior que sirvió para originar el proceso, las cargas positivas permanecerán en la lámina interior y las negativas en la exterior.

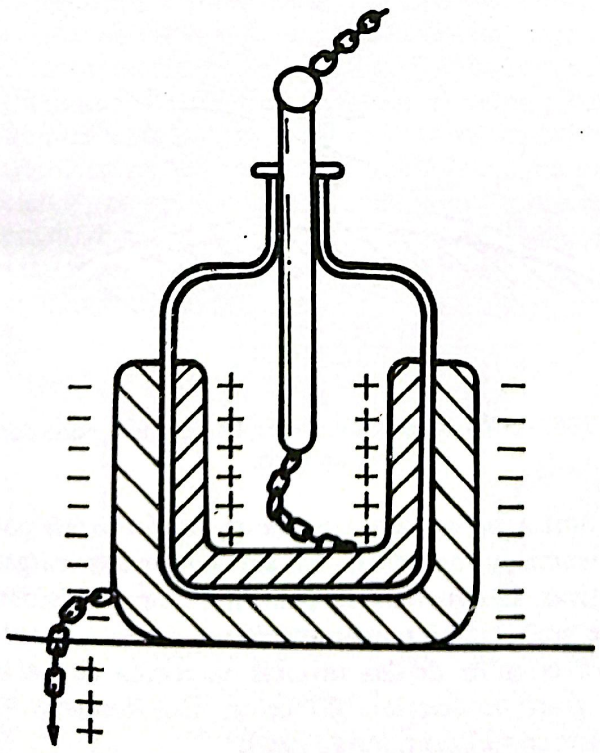


Fig. 206. – La botella de Leyden demostró el principio del condensador.

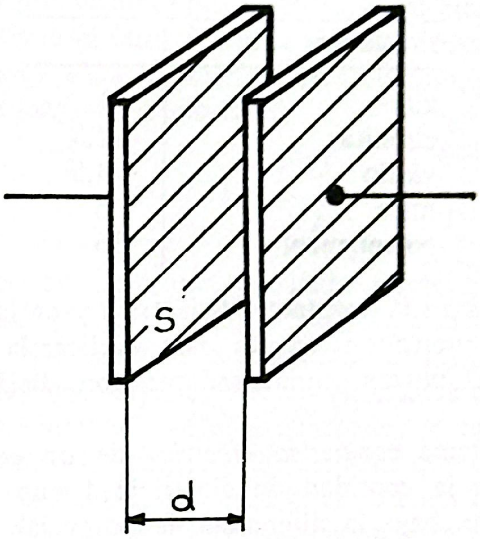


Fig. 207. – Un condensador puede formarse con dos placas paralelas.

Por una supuesta similitud con lo que ocurre con el vapor de agua cuando se condensa sobre un vidrio formando una película empañada, se llamó *condensador* eléctrico a ese conjunto, capaz de acumular y conservar cargas eléctricas. En la Electricidad moderna se lo denomina también *capacitor*. Pero no hace falta armar la botella con sus forros interno y externo, pues basta colocar paralelas dos placas metálicas (figura 207), para tener un condensador. Si conectamos un instante las dos placas a puntos de un campo eléctrico entre los que haya una diferencia de potencial, o unimos esas placas a los terminales o *polos* de una fuente eléctrica, se producirá el fenómeno antes explicado y el condensador se cargará. Claro, si entre las placas hay aire, la cantidad de carga acumulada será menor que si colocamos vidrio, mica u otras sustancias que han demostrado favorecer la acumulación de cargas.

El material colocado entre las placas se llama *dieléctrico* y si se lo compara con el aire, se llama *constante dieléctrica* del material a un coe-

ficiente que mide el número de veces que aumenta la acumulación de cargas en el condensador al colocarlo. Por ejemplo, la lista siguiente da las constantes dieléctricas de algunas substancias aptas para hacer condensadores:

substancia	*k*
aire	1
ebonita	2,5
vidrio	4,5
mica	6
Nitrobenzol	36

Donde k es la constante dieléctrica y en la tabla hemos puesto un líquido para explicar la razón de que existan condensadores con dieléctrico líquido.

Se llama *capacidad eléctrica* de un condensador a la cantidad de electricidad que puede acumular bajo la diferencia de potencial de un Volt entre sus placas:

$$C = \frac{Q}{V}$$

O sea que la capacidad está dada por el cociente entre la carga eléctrica y la diferencia de potencial entre sus placas. Si Q vale 1 Coulomb y V un Volt, se tiene la unidad de capacidad que se llama *Farad*. En la práctica, como esta unidad es muy grande se usa la millonésima parte, o sea el *microfarad* (μF). Y aún se usa la millonésima parte de esta última unidad, el *picofarad*.

La capacidad de un condensador depende de sus dimensiones físicas, según lo indica la figura 207. Si la superficie de las placas enfrentadas es S en cm^2, la distancia entre ellas es d en cm, y el material colocado entre ellas tiene una constante dieléctrica k, la capacidad de un condensador vale:

$$C = \frac{k\,S}{4\,\pi\,d}$$

Resultando como unidad en la fórmula anterior el centímetro para C; para reducir esta unidad física a la que dimos antes, se tiene la equivalencia:

$$1 \text{ Farad} = 9 \times 10^{11} \text{ cm}$$

o, tomando la unidad mencionada de la millonésima parte de la millonésima de un Farad, llamada *picofarad*

$$1 \text{ picofarad} = 0{,}9 \text{ cm}$$

La fórmula que da la capacidad de un condensador plano, así llamado porque las placas que lo forman son dos planos paralelos, nos permite deducir la manera de lograr construir *condensadores variables*. En efecto, si variamos la distancia d entre chapas, se alterará la capacidad. Si variamos la superficie enfrentada S, también se alterará C. Esto último se consigue dejando fija una de ellas y haciendo girar a la otra sobre un eje que es perpendicular a la misma. Todo el que haya observado el interior de un receptor de radio habrá visto un elemento formado por varias chapas fijas y varias que giran al accionar la perilla del dial de sintonía: se trata de un condensador variable.

Electricidad atmosférica

Las grandes masas en movimiento ocasionan electrización superficial de las mismas por roce o por influencia. El globo terráqueo no es una excepción y presenta una acumulación de cargas negativas en su superficie (figura 208). Las nubes,

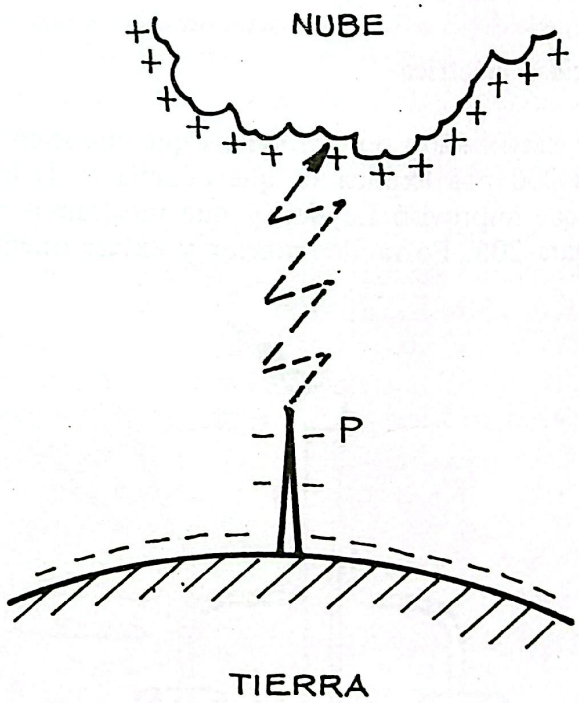


Fig. 208. – Una descarga entre la tierra y una nube forma un rayo.

que son a su vez grandes masas, se electrizan por influencia y aparecen en sus contornos cargas positivas. Las fuerzas de atracción que se originan entre esas grandes acumulaciones de cargas provocan el salto de las mismas en forma violenta, con gran producción de calor. Esa descarga se conoce con el nombre de *rayo*.

Para evitar que el rayo se produzca en cualquier lugar y ocasione destrozos, se acude al pro-

cedimiento indicado en la figura 201, o sea se provoca el viento eléctrico còlocando en la tierra salientes en punta que se llama *pararrayos*. Por el mismo escapan las cargas que son atraídas por la nube cargada y se produce la neutralización de cargas al juntarse las negativas con las positivas.

Pero aquí el lector podrá preguntar: ¿No es que el rayo *cae* sobre la tierra? —Durante mucho tiempo se creyó así, pero el fogonazo zigzagueante que se ve bajar a la tierra es una suerte de electrización progresiva del aire que se halla entre la tierra y la nube, fenómeno que se cumple con gran velocidad, pero no tanta como para que el ojo humano deje de percibirlo. Se trata de la *ionización* del aire que estudiaremos al fin del capítulo. Una vez que el aire ha sufrido ese proceso se produce la descarga desde la tierra hacia la nube, y eso se cumple con una velocidad casi igual a la de la luz (300 millones de metros por segundo), de modo que no se puede ver.

Otras veces las descargas ocurren entre dos nubes próximas, las que se han cargado con electricidad de signos contrarios por influencia; al acercarse más en sus desplazamientos desordenados, se produce la descarga. Son los relámpagos que vemos frecuentemente durante las tormentas.

La corriente eléctrica

Al clasificar a los cuerpos en buenos y malos conductores dijimos que los primeros, llamados directamente *conductores* de la electricidad, permitían el transporte o circulación de cargas eléctricas a su través con gran facilidad. Entonces, si tomamos un alambre metálico y unimos sus extremos a dos puntos A y B de un campo eléctrico, entre los que hay una diferencia de potencial V, se producirá un desplazamiento de cargas entre A y B, siempre que el potencial de A sea mayor que el de B. Ese desplazamiento de cargas se llama *corriente eléctrica* (figura 209).

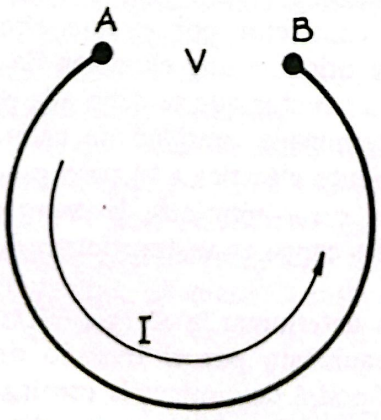


Fig. 209. – La circulación de cargas se llama corriente eléctrica.

Pero en cuanto se habla de corriente se puede pensar en medirla, o sea determinar la cantidad de cargas que corre por el alambre en la unidad de tiempo. Entonces, se llama *intensidad* de la corriente eléctrica, a la cantidad de carga que pasa por segundo por el cable. A tal intensidad se le asigna la letra I y se la mide en *Amper*. Como la carga eléctrica se mide en Coulomb, y el tiempo en segundos, resultará:

$$I = \frac{Q}{t}$$

y decimos que una corriente eléctrica tiene la intensidad de un Amper cuando pasa una carga de un Coulomb en cada segundo de tiempo.

¿De qué depende que una corriente sea más o menos intensa? —De dos factores: la fuerza que impulsa a las cargas y la facilidad que ofrezca el material del alambre para la circulación de cargas; esto debe ser aclarado convenientemente.

Las fuerzas actuantes no son otra cosa que el potencial eléctrico o, más específicamente, la diferencia de potencial entre los puntos a que están unidos los extremos del conductor; en el caso de la figura 209, esos puntos son A y B y entre ellos hay una diferencia de potencial o *tensión* eléctrica V. Cuando mayor sea esa tensión mayor será la intensidad de la corriente eléctrica circulante.

Y con respecto a la facilidad que ofrece el alambre a la circulación hay que hacer una aclaración. Al clasificar a los cuerpos en buenos y malos conductores, no establecimos cifras; para conducir cargas eléctricas tomamos un conductor, pero no existe el conductor absoluto. Los cuerpos conductores lo son en mayor o menor grado; por ejemplo el cobre es mejor conductor que el hierro y éste es mejor que el plomo. Cada cuerpo considerado conductor tiene una cifra que lo caracteriza. Pero, además de considerar la materia de que está hecho el alambre, interesan sus dimensiones físicas, pues no es lo mismo un alambre grueso que uno fino; lógicamente, el grueso permitirá una mayor conducción de cargas. Y un alambre corto será recorrido en menos tiempo que uno largo, o sea que si bien la cantidad de carga Q es la misma, la intensidad I será mayor en el corto que en el largo.

Así las cosas, se habla de la *resistencia* que ofrecen los cuerpos al pasaje de la corriente eléctrica en lugar de hablar de la facilidad que ofrecen a la circulación. La resistencia se mide en *Ohm* y se le asigna la letra R. Se establecen patrones comparativos y así se fijó como resistencia de un Ohm la que ofrece un alambre de mercurio

de un mm² de sección y 1,06 m de largo, a la temperatura de 0°C, ya que la resistencia varía con la temperatura.

En la técnica se usan tablas en las que se da la resistencia de un alambre de un metro de largo y un mm² de sección de cada material, cifra que se llama resistencia específica o *resistividad* del material. Como ejemplo damos algunas de esas cifras:

Material	*Resistividad*
aluminio	0,026
cobre	0,0175
hierro	0,1
mercurio	0,95
plata	0,016

Y una vez que tenemos la resistencia de un metro, podemos calcular la de un trozo de alambre más largo multiplicando por el largo, en metros; y si la sección no es de 1 mm², dividimos por la que tenga, ya que a mayor sección la resistencia disminuirá. O sea que la resistencia de un alambre es igual al valor de resistividad del material por el largo y dividido por la sección.

Ahora podemos determinar fácilmente el valor de la intensidad I de la corriente eléctrica que circula por el alambre de la figura 209, si conocemos la tensión V y la resistencia R del alambre, mediante la llamada *Ley de Ohm*:

$$I = \frac{V}{R}$$

O sea que la intensidad de corriente es proporcional a la tensión e inversamente proporcional a la resistencia eléctrica.

Potencia eléctrica

Si repasamos la definición de potencial eléctrico dada para la figura 204, recordaremos que era el trabajo realizado para llevar una carga unitaria desde el punto A hasta el origen del campo eléctrico. La diferencia de potencial entre dos puntos A y B, figura 209, será el trabajo necesario para llevar una carga unitaria desde A hasta B, que en este caso la llevamos por el cable. Si en lugar de una carga unitaria debemos llevar una carga Q, el trabajo será:

$$T = V Q$$

puesto que la diferencia de potencial entre A y B es la tensión V. Como la intensidad I es la carga transportada por segundo, podemos poner que Q vale el producto de la intensidad por el tiempo, o sea:

$$T = V I t$$

Y diremos que el trabajo que se realiza para transportar cargas eléctricas entre dos puntos cuya diferencia de potencial es V *Volts*, se determina por el producto de V por la intensidad I de la corriente en *Amperes* y por el tiempo transcurrido en segundos. El trabajo eléctrico se mide en *Joules*. Para medir la energía eléctrica que consumimos en nuestras casas se toma el tiempo en horas y resulta la unidad de trabajo o energía eléctrica el *Kilowatt-hora*. Para justificar esto veamos lo que sigue:

Sabemos que *potencia* es el trabajo realizado en la unidad de tiempo, o sea en un segundo. Luego, *potencia eléctrica* será el trabajo gastado en el transporte de cargas en cada segundo y como la carga transportada en un segundo es la intensidad de la corriente, la potencia eléctrica valdrá:

$$W = V I$$

que también sale de la fórmula de trabajo si la dividimos por el tiempo t. Para la potencia eléctrica se usa la letra W y la unidad de medida es el *Watt*. Cuando esta unidad es muy chica se emplea el Kilowatt, que vale 1000 Watt y ahora queda justificada la unidad comercial de energía eléctrica, antes mencionada. Digamos, de paso, que 1 Watt es 1 Joule realizado en un segundo.

Calor eléctrico

La corriente eléctrica no es otra cosa que la circulación veloz de cargas eléctricas por los conductores, pero esas cargas son pequeñas partículas que conocimos como electrones, y al circular provocan choques con los átomos que forman el conductor por el que circulan. Esa agitación da origen a una elevación de la temperatura del conductor que se debe a la producción de una determinada cantidad de calor. Es decir que la corriente eléctrica a su paso produce calor o, dicho en otros términos, la energía eléctrica que llevan las cargas se va transformando en energía térmica.

Sabemos determinar la energía eléctrica que se pone de manifiesto por el traslado de cargas y entonces se podrá determinar la cantidad de calor que se produce. Fue Joule quién dio la equivalencia respectiva, diciendo que una cantidad de

trabajo eléctrico se transforma en calor a razón de 0,24 calorías por cada Joule; la caloría mencionada es la gramo caloría, o sea la cantidad de calor que eleva en 1°C un gramo de agua. Como la expresión del trabajo eléctrico la conocemos, podemos escribir:

$$E = 0{,}24\ T$$

O sea que la energía térmica producida E o cantidad de calorías es igual a 0,24 de la cantidad de trabajo eléctrico dado en Joules. Podemos reemplazar T por su equivalente W, potencia eléctrica:

$$E = 0{,}24\ W\,t$$

y diremos que un artefacto eléctrico que tiene o consume una potencia W en Watts, conectado durante t segundos, produce una cantidad de calor dada por la expresión anterior.

Electroquímica – pilas eléctricas

En sus numerosas investigaciones Volta encontró que al poner dos metales diferentes en contacto, aparecía una diferencia de potencial eléctrico entre ellos; esa diferencia de potencial no dependía de la superficie ni del espesor de las placas en contacto, pero sí de la naturaleza de los metales. Posteriormente se encontró que el fenómeno dependía en grado sumo del hecho que las placas estuvieran humedecidas o no y que si se colocaba entre las placas un líquido ácido, el fenómeno adquiría proporciones notables. Así, si se arriman placas de mercurio y zinc, la diferencia de potencial al vacío es de 0,17 Volts, pero si se exponen al aire, con humedad normal, la cifra se eleva a 0,68 Volts. La diferencia de potencial de contacto se llamó *fuerza electromotriz* (f.e.m.) y se constató que si se colocaban capas superpuestas de dos metales alternándolas, se sumaban las fuerzas electromotrices, de donde surgió el nombre de *pila* que todavía conserva el elemento o par voltaico.

Experimentando con cuerpos diferentes, se comprobó que se podía formar una serie de ellos en la cual el que está colocado más arriba adquiere potencial positivo con respecto al que le sigue y negativo con respecto al que precede, al mismo tiempo que cuerpos más alejados en la lista dan ff.ee.mm. de contacto más elevadas. Tal lista es la siguiente:

1 – Carbón
2 – Platino
3 – Plata
4 – Cobre
5 – Hierro
6 – Estaño
7 – Plomo
8 – Zinc
9 – Aluminio
10 – Magnesio

Tomando dos placas de cobre y zinc, por ejemplo, se constata la aparición de una f.e.m. de 1 Volt aproximadamente, lo que se comprueba fácilmente. Este par formó la *pila de Volta*, que construyó el genial físico y que estaba formada por las dos placas citadas sumergidas en agua con ácido sulfúrico, según se ve en la figura 210. Un

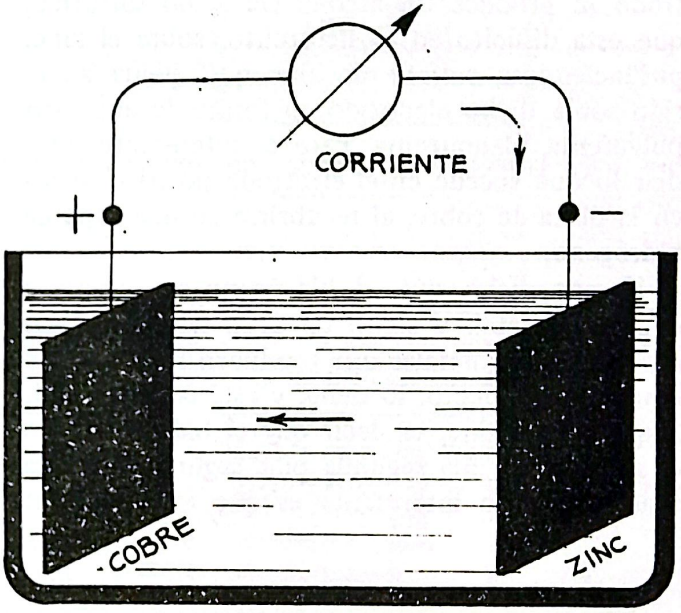


Fig. 210. – Principio de funcionamiento de la pila de Volta.

galvanómetro o aparato acusador del pasaje de corriente eléctrica indicaba una corriente decreciente con el tiempo hasta su extinción, lo que se atribuyó a la disminución de la f.e.m. en forma progresiva. Comprobaciones y estudios posteriores permitieron llegar a la conclusión de que la disminución de la f.e.m., y por ende, de la corriente de descarga de la pila se debía a un fenómeno ocasionado por la circulación de la corriente misma, al cual se denominó *polarización*. Para describirlo es necesario investigar los efectos que produce la corriente eléctrica al pasar por la solución de agua y ácido sulfúrico.

Polarización de la pila

El pasaje de corriente eléctrica por una solución ácida o *electrolito* produce una reacción química que separa al líquido en dos partes dife-

rentes, los metales siguen el sentido de la corriente y van al electrodo o placa positiva y los demás componentes van al electrodo o placa negativa. En el caso de la pila de Volta, el agua que tiene el electrolito se descompone en hidrógeno y oxígeno. El hidrógeno, que es un gas que se comporta igual que los metales, se dirige al electrodo positivo, depositándose sobre la placa de cobre en forma de burbujas. El oxígeno se dirige al electrodo negativo formando burbujas sobre la placa de zinc.

El resultado de la descomposición del agua por el pasaje de la corriente es entonces la presencia de hidrógeno sobre la placa de cobre y de oxígeno sobre la de zinc. En este último electrodo se produce un ataque del ácido sulfúrico, que está disuelto en el electrolito, sobre el zinc, produciéndose sulfato de zinc que queda adherido sobre dicho electrodo en forma de una capa pulvurenta blanquecina. Pero es interesante estudiar lo que sucede en el electrodo positivo, o sea en la placa de cobre, al recubrirse de una capa de hidrógeno.

Hemos dicho que el hidrógeno se comporta como un metal, y como tal debe tener un lugar en la serie de metales que producen ff.ee.mm. de contacto; en efecto, lo tiene, y está colocado más abajo que el zinc, es decir que el hidrógeno con el zinc forma una segunda pila, según se ve en la figura 211. Lo interesante es que ahora el zinc

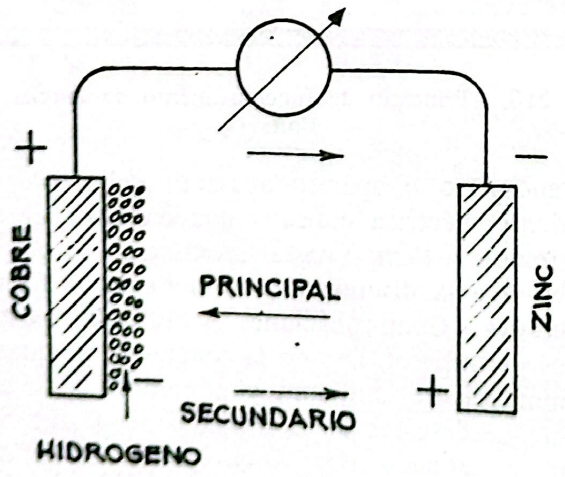


Fig. 211. - Forma en que se produce la polarización de la pila.

forma el polo positivo de esta pila y el hidrógeno el negativo. En la figura 210 hemos indicado el sentido de circulación de la corriente de la pila, que va en el interior del zinc al cobre y en el exterior del cobre al zinc, al formar el circuito cerrado. En la segunda pila, formada por el zinc con el hidrógeno, es evidente que el sentido de la corriente eléctrica será el que va del negativo al positivo en el interior de la pila, es decir, del hidrógeno al zinc, según la indica la figura 211.

El fenómeno descripto se denomina *polarización* de la pila y se ve que la corriente secundaria se resta de la principal, ocasionando la reducción que ya observó Volta. Al transcurrir el tiempo, el hidrógeno depositado aumenta y con

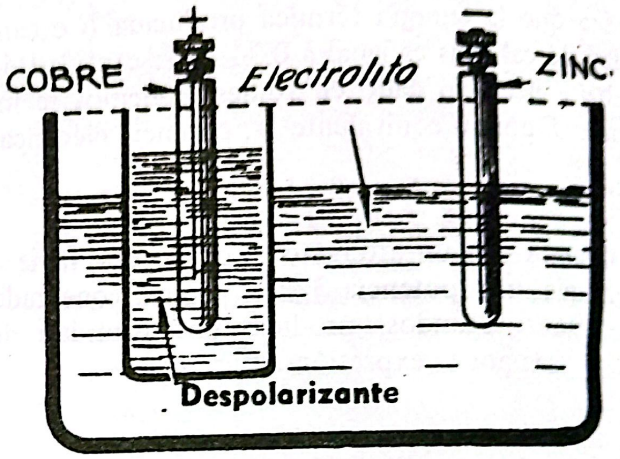


Fig. 212. - Al colocar un despolarizante dentro de la pila se mejora la misma.

ello la polarización se va acentuando, llegando a inutilizar la pila. De esto se deduce que el electrolito ofrece una resistencia al paso de la corriente, llamada resistencia interior de la pila; la polarización aumenta esa resistencia interna, puesto que tenemos dos nuevos elementos en el camino de la corriente: la capa gaseosa de hidrógeno en la placa de cobre y el oxígeno y la capa de sulfato de zinc sobre la placa de zinc. El aumento de la resistencia interior de la pila hace que se reduzca en mayor grado la intensidad de corriente circulante, con lo cual el fenómeno se acentúa notablemente.

Para evitar, o por lo menos reducir, el fenómeno de la polarización se ideó impedir que el hidrógeno llegue a la placa positiva; para tal fin se colocó el electrodo positivo dentro de un vaso poroso, en el cual se introduce una substancia química capaz de absorber o neutralizar al hidrógeno. El vaso debe ser poroso para permitir la circulación de la corriente, además de la función de impedir la reacción química entre el electrolito y la substancia neutralizadora o *despolarizante*.

En la figura 212 se muestra la disposición que ha tomado la pila así modificada, con los dos electrodos o placas, el vaso poroso dentro del cual está el despolarizante y allí sumergido el electrodo positivo; todo el conjunto está colocado dentro del electrolito.

El despolarizante debe ser una materia capaz de combinarse químicamente con el hidrógeno y

generalmente se usan substancias ricas en oxígeno, a efecto de que el exceso de éste forme agua con el hidrógeno. No siempre se busca la formación de agua, pues en los tipos comunes de pilas se usan otros tipos de reacciones químicas, basta que neutralicen el hidrógeno, que es el objeto de la despolarización.

Tipos de pilas usuales

Desde la pila de Volta, surgieron numerosos reformadores que trataron todos de obtener elementos que suministraran mayor f.e.m., que carecieran de polarización, y que tuvieran reducida resistencia interna, a fin de permitir una mayor corriente de descarga. Entre los tipos usuales merecen citarse los de Daniell, Bunsen, Leclanché, Poggendorff, etc. Citaremos las características de las mencionadas con fines de ilustración general.

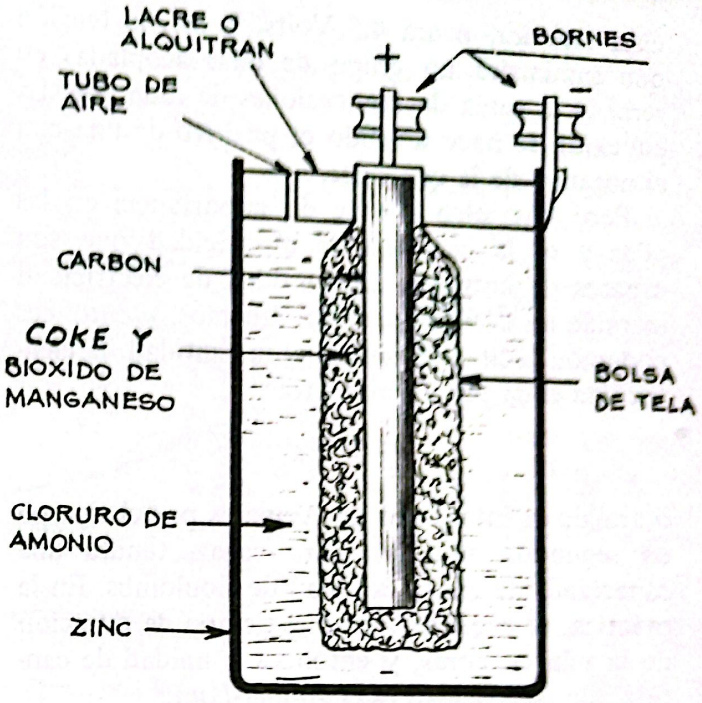


Fig. 213. – Corte que muestra la construcción de las pilas secas modernas.

Pila	*Positivo*	*Negativo*	*Electrolito*	*Despolarizante*	*F.E.M. Volts*
Daniell	cobre	zinc	ácido sulfúrico	sulfato de cobre	1,07
Bunsen	carbón	zinc	ácido sulfúrico	ácido nítrico	1,07
Leclanché	carbón	zinc	clorhidrato de amoníaco	carbón y bióxido de manganeso	1,47
Poggendorff	carbón	zinc	ácido sulfúrico	bicromato de potasio	2,0

Actualmente se ha generalizado el uso de una pila que es una versión modernizada en la Leclanché. Se denomina *seca* porque se prepara el electrolito en forma pastosa, a fin de hacerla transportable y que pueda trabajar en cualquier posición. Los componentes son los mismos que en la pila Leclanché, pero la diferencia está en la disposición; el vaso poroso se reemplaza por una bolsa de tela que contiene el despolarizante de coke y bióxido de manganeso (figura 213). El recipiente exterior se suprime, pues el mismo cilindro de zinc lo reemplaza, y se protege al conjunto con una capa externa de cartón. En la parte superior se cubre el contenido con una capa dura de lacre, que sirve al mismo tiempo para inmovilizar la barra central de carbón o polo positivo. En esa capa hay que dejar un tubo u orificio para salida de los gases que se forman durante las reacciones. Es costumbre asignarles una f.e.m. de 1,5 Volts.

Acoplamiento de pilas

El uso de las pilas se ha generalizado mucho, y baste citar que se las usa como fuente eléctrica en los receptores portátiles de radio. Pero muchas veces la tensión eléctrica de cada pila (1,5 Volts) es insuficiente para su uso y se recurre a sumar las tensiones de varias pilas, lo que se llama *acoplamiento en serie* (figura 214). Claro, si entre

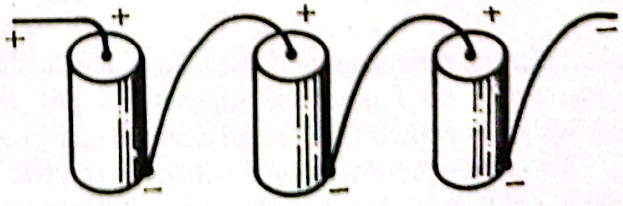


Fig. 214. – Acoplamiento de pilas en serie para tener mayor tensión.

extremos de una pila hay 1,5 Volts, entre los extremos de la serie de 3 pilas habrá tres veces la

cifra anterior, o sea 4,5 Volts. Y así, la tensión que suministra un grupo de pilas acopladas en serie es la suma de las tensiones de cada pila. La conexión se hace uniendo el positivo de una con el negativo de la que sigue.

Pero hay otro detalle de importancia en las pilas y es la cantidad de electricidad que son capaces de entregar. La cantidad de electricidad se mide en Coulombs, según sabemos, y entonces podemos decir que, siendo Q la cantidad de electricidad dada por el producto:

$$Q = I\,t$$

o sea de la intensidad de Amperes por el tiempo en segundos, una pila será capaz, tendrá una capacidad, de cierta cantidad de Coulombs. En la práctica, se prefiere tomar el tiempo de duración de la pila en horas, y entonces la unidad de cantidad de electricidad es el *Amper-hora*.

¿Qué se hace si la capacidad de una pila es poca? –Se pueden poner varias pilas conectadas en *paralelo* (figura 215). Esa conexión consiste

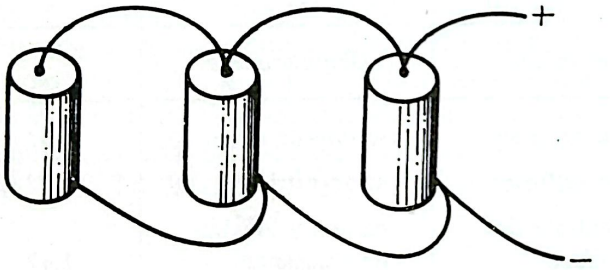


Fig. 215. – Acoplamiento de pilas en paralelo para tener mayor capacidad.

en conectar juntos todos los polos positivos y por otra parte todos los negativos. Es evidente que la tensión del conjunto seguirá siendo 1,5 Volts, pero la capacidad del conjunto es la suma de las capacidades de todas las pilas. Si una pila común pequeña tiene 5 Amper-horas, el grupo de la figura 215 tendrá 15 Amper-horas.

Electromagnetismo

La primera observación que se hizo acerca de la formación de fenómenos magnéticos por la electricidad la realizó Oersted, al acercar una brújula a un cable que conducía corriente eléctrica (figura 216); notó que la aguja de la brújula sufría una desviación como si estuviera sometida a una atracción magnética. De acuerdo con el sentido de la desviación y cambiando la posición de la brújula en torno al conductor, se encontró que

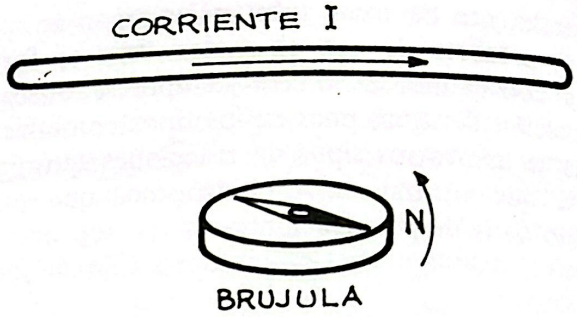


Fig. 216. – Efecto magnético de la corriente eléctrica.

se forma un campo magnético, cuyas líneas de fuerza son círculos concéntricos con el conductor, según lo muestra la figura 217. El sentido de las líneas de fuerza es el que marca la figura y entonces se estableció una regla práctica, llamada *del tirabuzón* que dice que si se hace avanzar al mismo en el sentido de avance de la corriente por el cable, el giro de su manija indica el sentido de las líneas de fuerza del campo magnético.

Si se considera un punto como el A comprendido en el campo magnético producido, la intensidad del campo magnético en ese punto vale:

$$H = \frac{2I}{d}$$

siendo I la intensidad de la corriente eléctrica y d la distancia entre A y el conductor que lleva esa corriente.

La idea de concentrar el campo magnético surgió de inmediato y fue la de arrollar el conductor en forma cilíndrica, tal como lo muestra la figura 218; a esa disposición se la llamó *bobina* o *sole-*

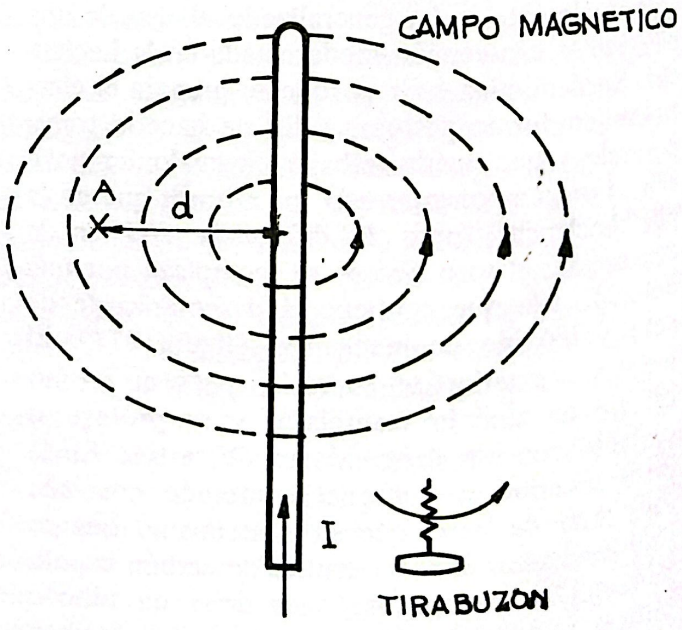


Fig. 217. – El campo magnético tiene líneas de fuerza concéntricas con el conductor.

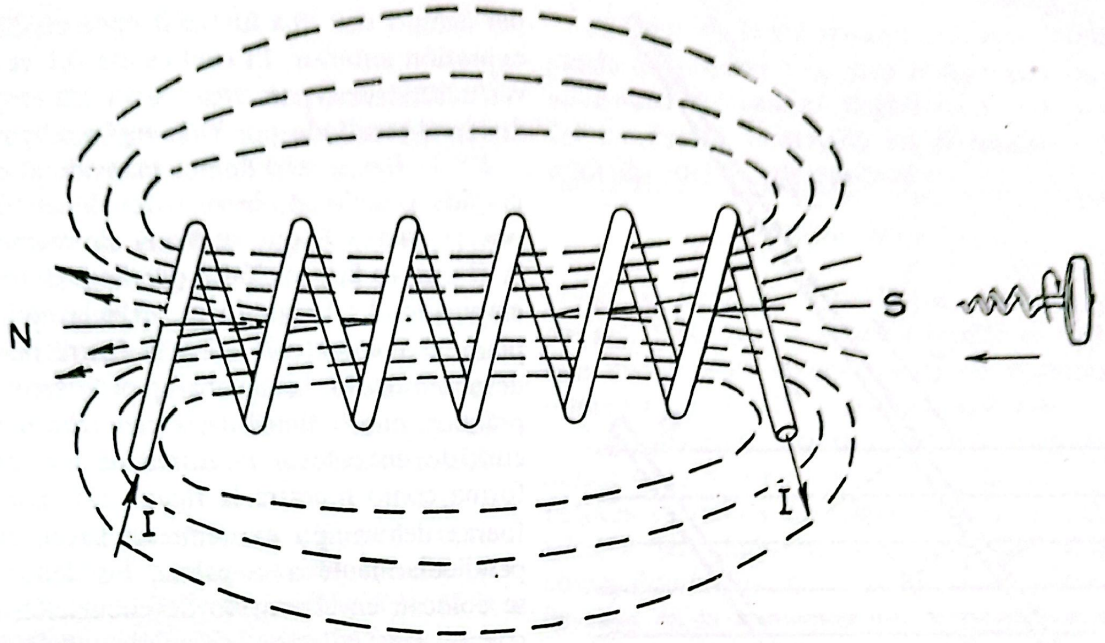


Fig. 218. – Arrollando el conductor se forma una bobina o solenoide.

noide. El campo magnético producido se concentra preferentemente en el interior de la bobina y tiene su polaridad Norte y Sur igual que los imanes. Para determinar esa polaridad se usa el mismo tirabuzón antes mencionado, haciéndolo girar en el mismo sentido que la corriente recorre al cable; la punta del tirabuzón avanza hacia el polo norte del llamado *electroimán*, puesto que esta bobina equivale a un imán (figura 186).

La intensidad del campo magnético en el interior del solenoide resulta aumentada por la superposición de cada vuelta o *espira* del cable, tal como si el campo de cada una se sumara. Además, si la bobina es alargada el campo será menos intenso que si es acortada, o sea con las espiras muy arrimadas. Y así resulta que la intensidad del campo magnético resulta proporcional a la cantidad de espiras y a la intensidad de la corriente eléctrica, pero inversamente proporcional a la longitud de la bobina o sea la distancia física entre la primera espira y la última. El valor de esa intensidad de campo es:

$$H = \frac{0{,}4\,\pi\,n\,I}{l}$$

que resulta en Gauss o líneas por cm^2 si se toma I en Amperes y l en cm.

En la técnica se aprovecha este fenómeno para construir electroimanes poderosos, arrollando cables en núcleos de hierro para aumentar la densidad magnética (figura 219). Haciendo pasar corriente por el bobinado se pueden levantar caños o barras de hierro de gran tamaño.

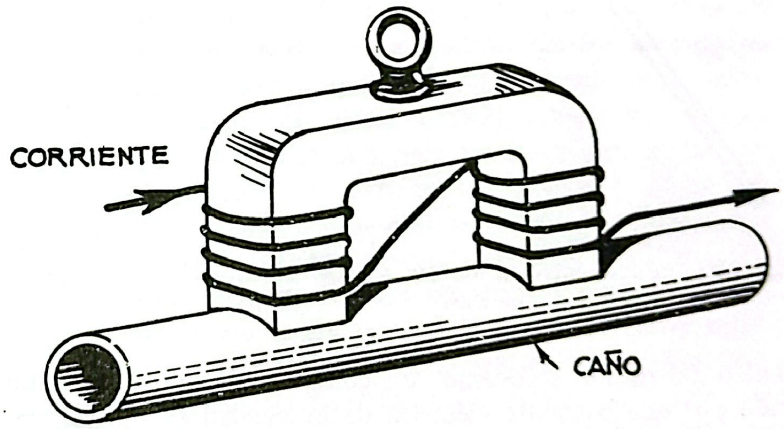


Fig. 219. – Un electroimán para levantar cuerpos pesados de hierro.

Fuerzas electromagnéticas

Desde que toda corriente engendra un campo magnético, si colocamos un conductor recorrido por corriente eléctrica dentro de un campo magnético se originará una fuerza de repulsión entre los dos campos magnéticos, el de la corriente y el que hay allí. En la figura 220 representamos un campo magnético que tiene una intensidad H;

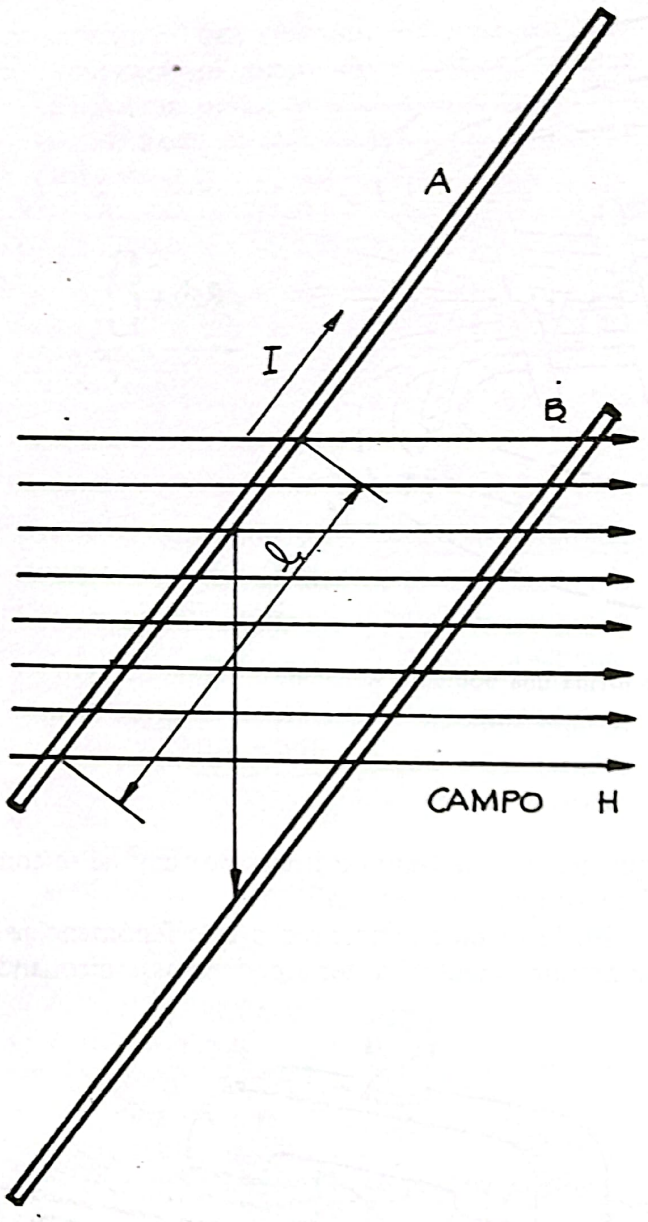


Fig. 220. – Representación de las fuerzas electromagnéticas.

dentro del mismo colocamos un conductor recorrido por una corriente eléctrica de intensidad I. La parte del conductor que queda sumergida dentro del campo tiene una longitud l y el resto del mismo queda afuera del campo y por consiguiente no se toma en cuenta. Se estableció que la fuerza de repulsión con que el conductor es empujado para sacarlo del campo es proporcional a esos tres datos, o sea:

$$F = 0{,}1\, H\, l\, I$$

O sea que si un conductor tiene un trozo de largo l (cm) sumergido en un campo magnético de intensidad H (Gauss), y lo recorre una corriente eléctrica de intensidad I (Amperes), las fuerzas de repulsión entre el campo existente y el campo que se forma alrededor de él lo empujarán fuera del campo con una fuerza F dada en dinas por la expresión anterior. El coeficiente 0,1 es para convertir unidades; para tener la fuerza en gramos se divide el resultado por 981, según sabemos.

En la figura 220 hemos marcado al conductor en dos posiciones, la A antes de ser desplazado por la fuerza F que se llama *electromagnética* y la B que es la posición a que llega después de ser empujado. La pregunta es: ¿Hacia dónde se desplaza el conductor? –En la figura marcamos el desplazamiento hacia abajo, pero hay una regla práctica, que se llama de la *mano izquierda* y que consiste en colocar la palma de esa mano en la forma como muestra la figura 221. Las líneas de fuerza del campo existente se hacen entrar perpendicularmente a la palma, los dedos estirados se colocan en el sentido de circulación de la corriente I y entonces el pulgar señala el desplazamiento del conductor o sea el sentido de la fuerza F.

Este principio es el que permitió construir todos los motores eléctricos que se usan actualmente en la industria y en aparatos eléctricos domésticos y esos motores tienen en su interior un campo magnético y una bobina recorrida por corriente eléctrica; las fuerzas de repulsión hacen girar a la parte interna del motor.

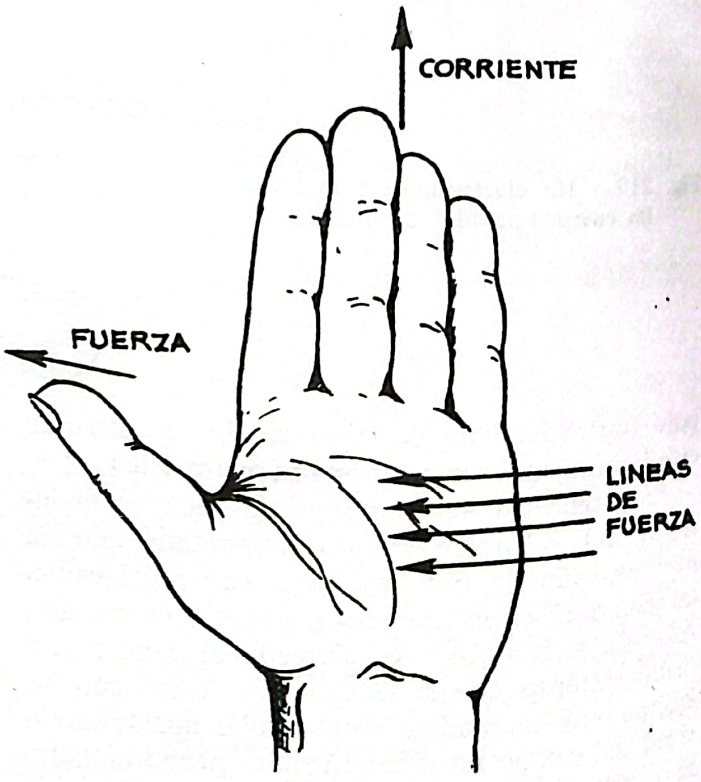


Fig. 221. – Regla de la mano izquierda para encontrar el sentido del desplazamiento de un conductor.

Inducción electromagnética

Los efectos recíprocos entre corriente eléctrica y campo magnético pueden presentarse de otra manera. Si colocamos un conductor dentro de un campo magnético y lo movemos bruscamente de manera que corte la línea de fuerza del campo, aparecerá una diferencia de potencial entre los extremos del conductor, a la que se llama *fuerza electromotriz*. Si recordamos las *pilas*, veremos que este es el nombre que se aplica a una tensión eléctrica generada por un dispositivo que en aquél caso era químico y aquí es electromagnético.

Podemos usar la misma figura 220, pero suprimimos la corriente I pues no existe en el conductor. Lo movemos desde la posición B hasta la 1 de modo que cortará las líneas de fuerza del campo magnético. Al hacerlo constataremos la aparición de una *f.e.m.* entre extremos del conductor, que, a circuito cerrado, o sea uniendo con un cable los extremos del conductor, dará origen a la circulación de una corriente eléctrica.

El sentido de esa f.e.m. y el de la corriente que ella puede originar se determina con la regla práctica de la *mano derecha* (figura 222); se coloca la palma de manera que reciba de frente a las líneas de fuerza y que el pulgar indique la dirección que dimos al desplazamiento del conductor. Así, los dedos estirados nos marcan el sentido de la f.e.m. y de la corriente.

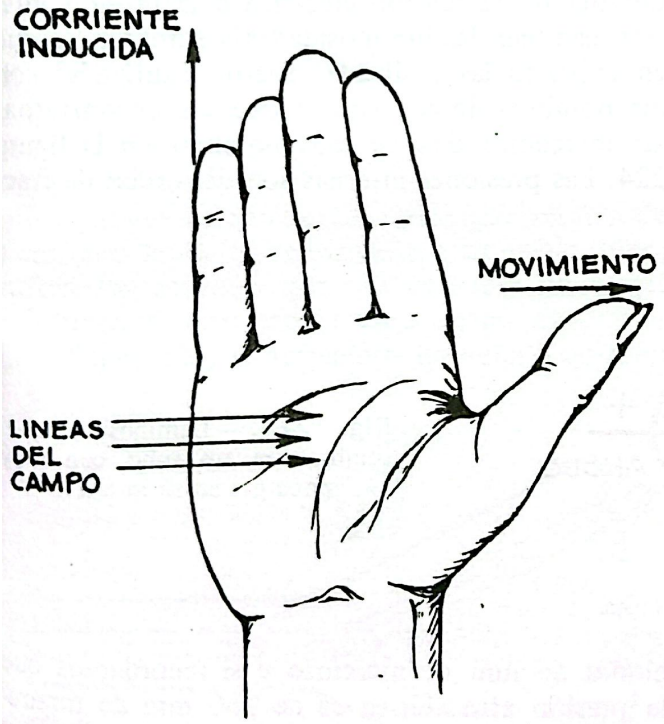


Fig. 222. Regla de la mano derecha para encontrar el sentido de la corriente inducida.

El valor de la f.e.m. inducida en el conductor puede determinarse, ya que será proporcional a la intensidad del campo magnético H, a la longitud del conductor sumergida en el campo, l y a la velocidad del desplazamiento v:

$$e = H\,l\,v$$

donde si se toma H en Gauss, l en cm y v en cm/seg, para que la f.e.m. e resulte en Volts hay que dividir por un coeficiente de corrección de unidades que es 10^8 o sea cien millones.

Este principio, llamado *inducción electromagnética* es el que ha permitido construir los generadores eléctricos que abastecen de energía eléctrica a las ciudades, tanto para uso industrial como doméstico. Las usinas tienen generadores basados en la inducción electromagnética, donde el desplazamiento de los conductores dentro del campo magnético se logra mediante el impulso de motores térmicos o hidráulicos, que ya hemos estudiado.

Corriente eléctrica en los gases

En los sólidos los electrones liberados de los átomos se desplazan velozmente impulsados por las fuerzas eléctricas y constituyen la corriente eléctrica que ya conocemos. En los líquidos la conducción adquiere muchas veces otra particularidad, tal como ocurría en el caso de las pilas. La polarización de los átomos ocasiona una disociación en partículas positivas y negativas, que adquieren movimientos hacia los polos negativo y positivo respectivamente. La figura 223 muestra esas dos circulaciones y sus sentidos, y los polos toman los nombres de *cátodo* el *negativo* y *ánodo* el *positivo*. Estos polos no son otra cosa que placas o barras sumergidas en el líquido conductor, y conectadas a una fuente eléctrica.

Las partículas con carga eléctrica en la conducción a través de líquidos toman el nombre de *iones* y tendremos un ión negativo cuando un electrón se asocia a una partícula neutra y ión positivo, cuando falta un electrón de una partícula neutra.

En los gases también se produce un proceso similar, y la conducción de cargas eléctricas a través de los mismos se produce mediante una *ionización*, es decir que las moléculas de gas toman un electrón en exceso o pierden uno, dejando su condición de neutra o equilibrada. La diferencia en la conducción de gases con respecto a los líquidos es que antes de iniciarse el proceso no hay iones en el gas, y ellos se forman por

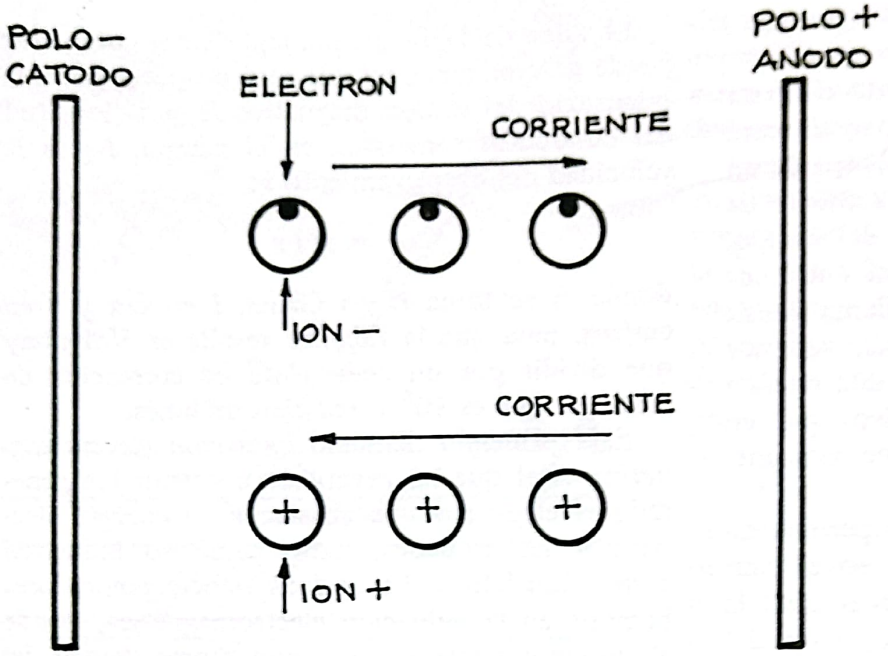


Fig. 223. – La conducción de corriente a través de los líquidos.

choques de electrones contra los átomos del gas. Así se van arrancando electrones de algunos átomos y tendremos electrones libres o iones negativos y átomos con pérdida de electrón, o iones positivos. Este proceso se denomina *ionización por choque* y se generaliza en toda la masa del gas, produciéndose la conducción eléctrica a su través. Estas consideraciones se refieren a los gases libres o sea que se hallan a la presión normal o atmosférica.

Resulta interesante estudiar el comportamiento de los gases a baja presión o sea fuertemente expandidos en un recinto. Montemos el aparato que muestra la figura 224, que consiste en un tubo en cuyos extremos se han introducido dos placas metálicas que serán conectadas a una fuente eléctrica externa. La placa que se conecte al polo positivo se llama *ánodo* y la que va al negativo se llama *cátodo* (*A* y *K*). Mediante una bomba de vacío se extrae aire del tubo y comienza a producirse la ionización del gas aún cuando el tubo sea largo. La fuente externa comienza a proveer corriente eléctrica que pasa por el interior del tubo.

Además del proceso de ionización, se producen luminosidades en zonas a lo largo del tubo, a lo cual se llamó *luminiscencia*. La figura 224 marca la situación de luminosidades y espacios oscuros para una cierta diferencia de potencial entre ánodo y cátodo y para una cierta presión interior, que según hemos dicho será siempre menor que la atmosférica, mucho menor. Cambiando la tensión eléctrica o la presión interior, cambian las luminosidades y sombras las que en experiencias realizadas fueron bautizadas con los nombres de los físicos que las encontraron; así marcamos dos de esos nombres en la figura 224. Las presiones internas son del orden de fracciones de mm de mercurio y si recordamos que la presión atmosférica es de 760 mm de mercurio, comprenderemos que dentro del tubo hay vacío absoluto pero se está cerca de ellos.

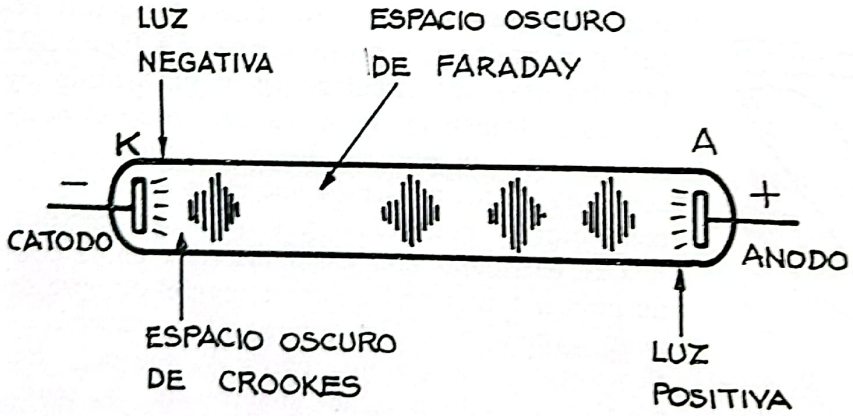
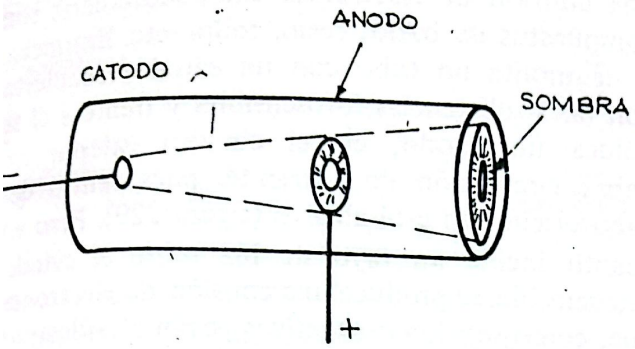


Fig. 224. – Luminosidades y sombras en un tubo con muy poco gas en su interior.

En el interior del tubo se ha producido la ionización del gas y tendremos iones positivos y negativos, los que circulan en las direcciones indicadas en la figura 223. Si se reduce más la presión interna, hasta el orden de un milésimo de mm de mercurio, la ionización se torna violenta



ig. 225. – Los rayos catódicos son rectilíneos pues proyectan la sombra del ánodo.

orque al haber menor cantidad de moléculas de as (puede ser aire) ellas tienen mayor posibilidad le desplazamiento. Se llega así a que los iones ositivos que parten del ánodo chocan violentamente contra el cátodo y provocan en este un esprendimiento de electrones con violencia; los ismos son atraídos por la carga positiva del nodo y forman un haz rectilíneo de filas veloces e electrones o iones negativos, llamados *rayos atódicos* que son una verdadera *radiación electrónica*. La demostración de que los rayos catódicos son rectilíneos se realizó con un dispositivo omo el mostrado en la figura 225. Consta de un ubo en el cual el cátodo está en un extremo y el nodo tiene una forma anular. En el extremo de a derecha aparece la sombra del ánodo, proyectada por los rayos catódicos que pasan por todas partes menos por la parte maciza del ánodo; la ombra será un anillo.

Los rayos catódicos, formados por un haz de electrones lanzados velozmente a través del tubo, sufren las acciones que operan sobre las cargas eléctricas, y que hemos visto antes. Por ejemplo (figura 226) si acercamos un imán a un tubo

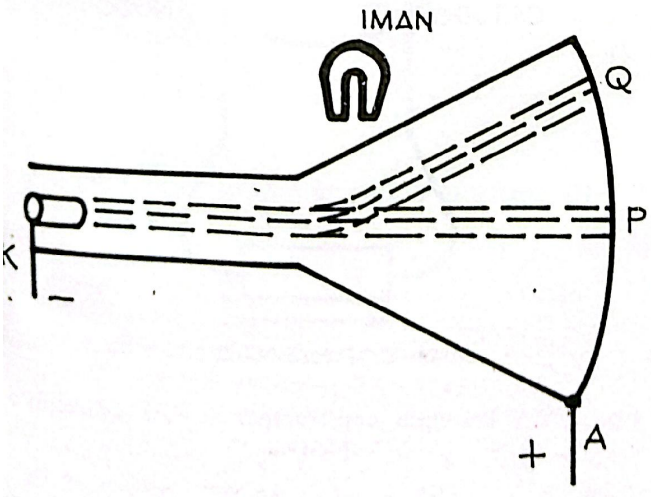


Fig. 226. – Los rayos catódicos son desviados por la acción de un campo magnético.

de rayos catódicos, se producirá una desviación de los rayos, que en lugar de llegar al centro de la pantalla o ánodo, punto *P*, llegarán al punto *Q*. También puede producirse la desviación con un electroimán, acercando al cuello del tubo una bobina recorrida por corriente eléctrica. Y también podemos colocar fuera del tubo dos placas conectadas a una fuente eléctrica de manera que entre ellas se produzca un campo eléctrico. El rayo catódico (figura 227) será desviado hacia

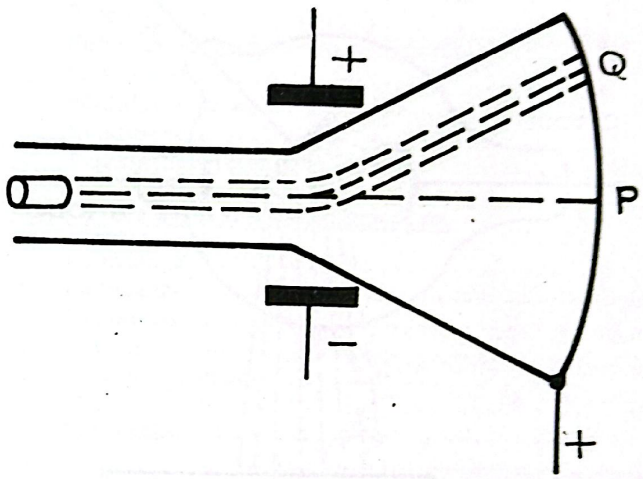


Fig. 227. – Un campo eléctrico también desvía los rayos catódicos.

arriba, porque sus iones negativos (electrones) serán atraídos por la placa positiva y rechazados por la negativa.

Cabe mencionar que el tubo de rayos catódicos tiene hoy día una aplicación cuya magnitud es imposible calibrar; baste decir que el tubo de imágenes de los televisores es un tubo de rayos catódicos, para ahorrar mayores comentarios. En tales casos la pantalla frontal es translúcida y fluorescente, para producir imágenes luminosas. Esto último conviene aclararlo.

Los rayos catódicos pueden provocar luminosidad en ciertas substancias. Si enviamos rayos catódicos sobre un cristal recubierto con esas substancias que se llaman *fluorescentes* por su propiedad, el cristal se ilumina. Las substancias mencionadas son compuestos de fósforo, un cuerpo natural cuyo nombre se usó para designar popularmente a las cerillas para encender fuego.

Rayos X – radiaciones

De las experiencias de Röntgen surgió que los rayos catódicos al chocar contra las paredes del tubo provocaban la emisión de otros rayos invisibles para los cuales la mayoría de los cuerpos

son permeables, pues los atraviesan con facilidad, tal como hace la luz con el vidrio. A esas *radiaciones* las llamó *rayos X* por desconocer su naturaleza. Posteriormente se encontró que los rayos X provocaban luminosidad al incidir sobre ciertas substancias como ciertas sales de bario. Entonces se descubrió una importante aplicación de tales rayos, utilizando un aparato como el ilustrado en la figura 228.

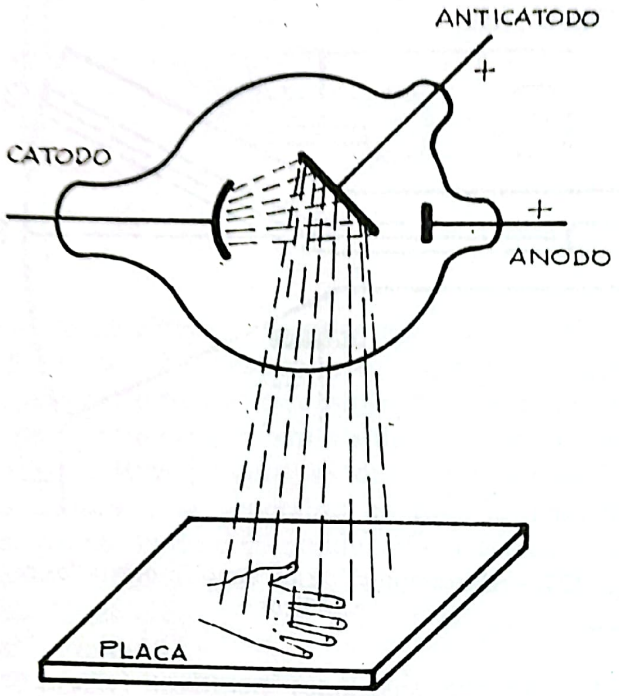


Fig. 228. – Forma de producir radiaciones llamadas rayos X.

Se coloca dentro de un tubo de rayos catódicos una placa oblicua para que los mismos choquen contra ella y provoquen la emisión de radiaciones de rayos X. Los mismos salen hacia abajo y llegan a una placa sensibilizada con sales de bario u otras que tengan la misma propiedad. Interponiendo en el camino de los rayos un cuerpo, ellos atravesarán las partes blandas y no las macizas, y en la placa quedará una fotografía en negativo de las últimas. Esto no es otra cosa que la *radiografía* que se usa tanto en medicina. En el caso de la figura 228, la placa quedará con la imagen de los huesos de la mano, en imagen negativa.

Fotoelectricidad

Einstein descubrió que si se hacía incidir un rayo de luz sobre ciertas substancias, se producía una emisión de electrones. Tales substancias son compuestos de bario, cesio, sodio, etc. Entonces, si se monta un tubo con un cátodo recubierto con tales substancias fotosensibles y frente a él se coloca un ánodo, en el circuito exterior no habrá circulación de corriente, pues dentro del tubo el circuito está abierto (figura 229). Pero en cuanto incide un rayo de luz sobre el cátodo fotosensible, se produce una emisión de electrones que, como son iones negativos, serán atraídos por el ánodo, cargado positivamente y se produce una circulación de corriente eléctrica por el circuito.

El dispositivo que produce emisión electrónica al incidir la luz se llama *célula fotoeléctrica* o *fotocélula* y tiene numerosas aplicaciones. Para citar la más importante, diremos que en cinematografía, el sonido se graba al costado de la película mediante una banda claro-oscura; una luz atraviesa esa banda e incide sobre una fotocélula, que dará una corriente mayor o menor según la claridad que tenga la banda en cada punto. Llevando esa corriente variable a un reproductor que la transforma en sonido, se obtuvo el cine sonoro. Además, las células fotoeléctricas son la base de los tubos captores de imágenes para transmisores de televisión.

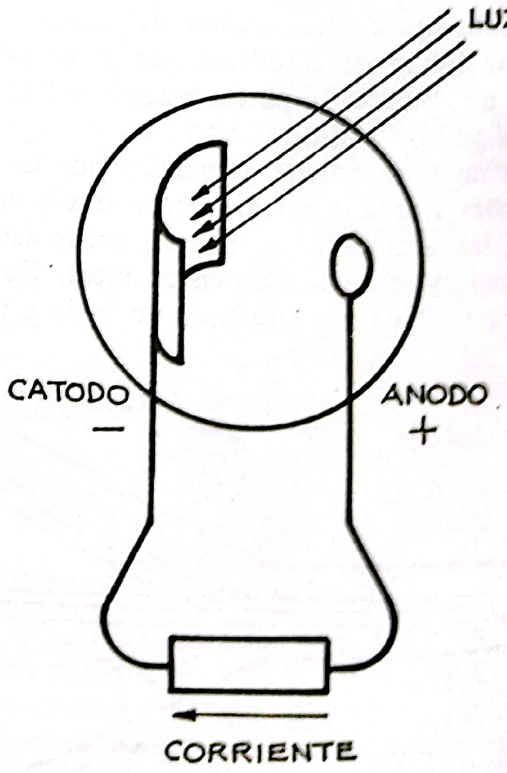


Fig. 229. – Principio constructivo de una célula fotoeléctrica.

INDICE GENERAL

DIA 1. – LA MATERIA Y LOS CUERPOS 5

Estado de los cuerpos 5
Cambios de estado de los cuerpos 6
Estados especiales 6
Constitución íntima de la materia 7
Acciones entre moléculas 8
Propiedades de los cuerpos 9
Propiedades recíprocas. Adherencia 10

DIA 2. – MEDIDAS Y PESO DE LOS CUERPOS . 12

Medidas de longitud 12
Medidas de superficie 14
Medidas de volumen 14
Medidas de capacidad y peso 15
Peso específico 16

DIA 3. – LAS FUERZAS Y SU EQUILIBRIO. ESTATICA 17

La fuerza como un vector 17
Composición de vectores de igual dirección ... 18
Composición de vectores de direcciones distintas 19
Momento de una fuerza 21
Cupla de giro 22
Descomposición de fuerzas 22
Concepto de equilibrio 24

DIA 4. – ESTUDIO DE LOS MOVIMIENTOS. CINEMATICA 25

Clases de movimiento 25
Movimiento rectilíneo uniforme 26
Movimiento acelerado o retardado 28
Movimiento circular 29
Movimiento oscilatorio 30
Movimiento ondulatorio 32

DIA 5. – EFECTOS DE LAS FUERZAS. DINAMICA 34

La inercia 34
Caída de los cuerpos 34
Concepto de masa 35
Principio fundamental de la Dinámica 36
Centro de gravedad 37
Condiciones de equilibrio 37
Fuerza centrífuga 39
Oscilación del péndulo 40
El problema del tiro 41
Impulso. Cantidad de movimiento 44
Choque elástico 45

DIA 6. – TRABAJO Y ENERGIA 47

Trabajo 47
Potencia 49
Potencia en movimiento de rotación 50
Rozamiento 51
Pérdidas de trabajo 52
Rendimiento 52
Transformaciones de la energía 53

DIA 7. – LAS MAQUINAS SIMPLES 55

La palanca 55
La balanza 57
Las poleas 58
El torno 60
El plano inclinado 60
La cuña 61
El tornillo 61

DIA 8. – ESTUDIO DE LOS LIQUIDOS 63

Hidrostática. Presión 63
Principio de Pascal 63
Líquidos con superficie libre 64
Empuje sobre las paredes 64
Principio de Torricelli 65
Vasos comunicantes 65
Capilaridad 66
Principio de Arquímedes 67
Flotación 67
Hidrodinámica. Caudal 68
Velocidad 68
Derrame por orificios 69
Medición de la velocidad 69
Medición del gasto 70
Bombas de émbolo 70
Prensa hidráulica 71
Bombas centrífugas 72
Ruedas hidráulicas 73
Ruedas Pelton 74
Turbinas hidráulicas 75
Turbina Francis 75
Turbina Kaplan 76

DIA 9. – ESTUDIO DE LOS GASES. NEUMATICA 77

Peso de un gas 77
Presión atmosférica 78
El barómetro 79
Altímetros 80
La pipeta de vacío 80
El sifón 80
Las bombas de compresión 81
Depresores y compresores 82
Empuje hacia arriba 83
Aerodinámica 84

DIA 10. – ESTUDIO DEL CALOR. TERMOLOGIA 85
Temperatura 85
Termómetros 85
Termómetros de máxima y mínima 87
Calor contenido en los cuerpos 87
Calor específico 88
Dilatación por efecto del calor 88
Fusión de los sólidos 89
Ebullición de los líquidos 90
Ebullición retardada y acelerada 91
El vapor de agua 91
Producción de vapor 92
Humedad del aire 92
Transmisión del calor 94
Transmisión por conducción 95
Transmisión por convección 96
Transmisión por radiación 96

DIA 11. – APLICACIONES DEL CALOR. TERMODINAMICA 97
Propiedades de gases y vapores 97
Principios fundamentales de la Termodinámica 98
Leyes para los gases perfectos 98
Cambios de estado de gases y vapores 100
Motores térmicos 101
Funcionamiento del motor de cuatro tiempos. 102
Funcionamiento del motor de dos tiempos. 104
Ciclo de trabajo 105
La combustión 105
Refrigeración 106
Ciclo de la refrigeración 106
Compresores rotativos 107

DIA 12. – ESTUDIO DEL SONIDO. ACUSTICA. 108
La onda sonora 108
Las vibraciones sonoras 109
Características del sonido 110
Propagación del sonido 111
Reflexión y refracción 112
Interferencia de ondas 113
El efecto Doppler 113
Nivel sonoro 115
Reverberación 116

DIA 13. – ESTUDIO DE LA LUZ. OPTICA. 117
Fuentes de luz 118
Fotometría 118
Fotómetros 119
Reflexión de la luz 120
Espejos planos 120
Espejos esféricos 121
Refracción de la luz 122
Lentes esféricas 123
Lentes médicas 125
La cámara fotográfica 126
La cámara proyectora 126
La cinematografía 127
El telescopio 127
El microscopio 128
Dispersión de la luz 128
El espectro luminoso 130
Filtros de color 130
Difracción de la luz 131
Polarización de la luz 131

DIA 14. – ESTUDIO DE LOS IMANES. MAGNETISMO 133
Polos del imán 133
Manetismo terrestre 134
La imanación 135
Masa magnética 136
Ley de Coulomb 136
Campo magnético 136
Inducción magnética 137
Curvas de imanación 138

DIA 15. – ESTUDIO DE LA ELECTRICIDAD. 140
Clases de electricidad 140
Electrización de los cuerpos 141
Conducción de las cargas eléctricas 141
Naturaleza de la electricidad 142
El campo eléctrico 143
Potencial eléctrico 144
Capacidad eléctrica 145
Electricidad atmosférica 146
La corriente eléctrica 147
Potencia eléctrica 148
Calor eléctrico 148
Electroquímica. Pilas eléctricas 149
Polarización de la pila 149
Tipos de pilas usuales 151
Acoplamiento de pilas 151
Electromagnetismo 152
Fuerzas electromagnéticas 153
Inducción electromagnética 155
Corriente eléctrica en los gases 155
Rayos X. Radiaciones 157
Fotoelectricidad 158

Esta edición
se terminó de imprimir en los
Talleres Gráficos TALGRAF
Talcahuano 638/Buenos Aires/Argentina
en el mes de mayo de 1979.